

Clarianne Natali de Campos

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DA REGIÃO ABAIXO DA
SUPERFÍCIE NO TORNEAMENTO DE MATERIAIS
ENDURECIDOS COM FERRAMENTAS DE PCBN E METAL-
DURO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Rolf Bertrand
Schroeter, Dr. Eng.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Campos, Clarianne Natali de

Análise da integridade da superfície no torneamento de
materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e metal-duro
/ Clarianne Natali de Campos ; orientador, Rolf Bertrand
Schroeter - Florianópolis, SC, 2016.

150 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Torneamento de materiais
endurecidos. 3. Integridade da superfície. 4. Rugosidade.
5. Alterações microestruturais. I. Schroeter, Rolf Bertrand
. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Clarianne Natali de Campos

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE NO
TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS COM
FERRAMENTAS DE PCBN E METAL-DURO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 27 de abril de 2016.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. - Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. -Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Sueli Fischer Beckert, Dr.^a Eng.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha família,
pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Rolf Bertrand Schroeter, pelo orientação e apoio.

Ao Professor Walter Lindolfo Weingaertner, pelo incentivo e sugestões para a realização deste trabalho.

A Denis Boing, minha imensa gratidão por toda confiança, incentivo, aprendizados e amizade construída. Você foi parte fundamental não somente da concretização deste trabalho, mas também da pessoa que hoje sou. Obrigada por me inspirar e fazer parte da minha história.

A Vinícius Rodrigues Borba, pelo companheirismo e por dividir quase que diariamente as alegrias e dificuldades desta etapa, minha sincera gratidão.

À Larissa Juliana Sirtuli, quem eu tive a honra de auxiliar durante o período do seu estágio no LMP e sem a qual este trabalho não se finalizaria em tempo hábil. Muito obrigada por todo carinho, confiança e apoio.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e do Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON), pelos bons momentos compartilhados e os ensinamentos ao longo desses dois anos. Em especial, à Alaide Maria Goulartt, pela amizade e por tornar meus dias mais leves e risonhos.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), ao Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON), ao Laboratório de Materiais (LABMAT), ao Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT), ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) e ao Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Ao Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação (CTIF), do Centro Universitário de Brusque (UNIFEBS), por disponibilizar a infraestrutura e suporte necessários para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade concedida.

À FAPESC, pelo apoio financeiro ao projeto ao qual este trabalho está vinculado.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa de estudo.

Às empresas parceiras desta pesquisa, a Tecnotêmpera e a Sandvik Coromant, pela disponibilização de serviços e materiais.

À minha mãe e melhor amiga, Maria Alaide Natali, por ser meu exemplo de pessoa e mulher, por sempre acreditar em mim e dar todo o

suporte necessário para a concretização dos meus planos e sonhos. Obrigada é muito pouco para expressar minha imensa e eterna gratidão.

Ao meu pai, Humberto de Campos, por nunca ter medido esforços para permitir que eu tivesse condições para lutar pelos meus objetivos.

À minha tia e madrinha, Maria Regina Natali, por todo amor, carinho e paciência nos dias em que tudo parecia desabar. Obrigada por ter transformado sua casa no meu lar durante esses dois anos.

Ao meu irmão, João Vitor Natali de Campos, por toda amizade e companheirismo. Boa parte da tranquilidade de estar do outro lado do país foi graças a você, com quem sempre soube que poderia contar.

Ao meu companheiro, Igor Thiago Silva de Sousa, pelo amor, amizade e por dividir não somente sua vida comigo, mas também por termos construído juntos esta jornada.

A todos os meus amigos, que mesmo com a distância e com as consequentes ausências, sempre estiveram me apoiando e torcendo por mim.

Às novas amizades construídas neste novo período, que dividiram suas histórias comigo e que acalentaram os dias nesta ilha.

A todos e todas que contribuíram para realização deste trabalho, meu muito obrigada.

" - Não vê os rios que nunca enchem o mar? A vida de cada um também é assim: está sempre toda por viver." (Mia Couto)

RESUMO

Ao longo das etapas de manufatura de um componente mecânico, os processos de fabricação afetam diretamente o estado microgeométrico da superfície e as propriedades do material nas camadas da subsuperfície. Fenômenos como a formação de camada branca, deformação plástica e o cisalhamento de carbonetos, por exemplo, impactam diretamente no desempenho do componente, principalmente quanto a vida por fadiga, pois as regiões afetadas são propensas a nucleação e propagação de trincas. Aços endurecidos têm sido empregados na fabricação de engrenagens, rolamentos, matrizes e demais componentes críticos de engenharia, os quais necessitam de elevada resistência ao desgaste, o que torna relevante o estudo da integridade da superfície. O processo de torneamento de materiais endurecidos tem se tornado uma possibilidade à retificação, reduzindo custos e tempos. Devido aos elevados custos das ferramentas empregadas no torneamento, como o PCBN e cerâmicas, e com o consequente desenvolvimento de tecnologias de revestimento e redução de grãos, ferramentas de metal-duro têm despontado como uma alternativa economicamente viável para este tipo de operação. Assim, este trabalho visa avaliar a integridade da superfície para os aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2, em seis valores de dureza, usinados com ferramentas de PCBN e metal-duro de grãos ultrafinos. Primeiramente foram avaliadas as rugosidades 2D e 3D das superfícies usinadas e verificou-se que para durezas até 50 HRC, ambas as ferramentas de corte apresentaram comportamentos similares, em termos de acabamento da superfície. Entretanto, acima deste valor, a usinagem com ferramenta de metal-duro apresentou maiores instabilidades, gerando superfícies com baixo desempenho funcional. Este comportamento está associado à geometria da ferramenta e às características microestruturais dos materiais. Posteriormente, foram analisadas as alterações microestruturais e verificou-se que o fator dureza não é determinante no comportamento das superfícies usinadas, mas sim a microestrutura. Outra característica observada em quase todos os ensaios é que a camada submetida a alteração é muito fina, resultado este associado aos parâmetros de corte e às geometrias das ferramentas. Em relação aos materiais, os três aços apresentaram camada branca por transformação de fase e no aço AISI D2, em específico, foi observado o cisalhamento de carbonetos.

Palavras-chave: Torneamento de materiais endurecidos. Integridade da superfície. Rugosidade. Alterações microestruturais.

ABSTRACT

Along a mechanical component manufacturing steps, manufacturing processes directly affect the microgeometric surface condition and material properties in the subsurface layers. Phenomena such as the formation of white layer, plastic deformation and shear carbides, for example, directly impact on component performance, especially as the fatigue life, as the affected areas are prone to nucleation and propagation of cracks. Hardened steels have been employed in the manufacture of gears, bearings, dies and other critical components of engineering, which require high wear resistance, which makes it relevant to the study of surface integrity. Hard turning has become an alternative to grinding, reducing costs and time. Due to the high cost of the tools, PCBN and ceramics, for example, and the consequent development of coating and reduction grains technologies, carbide tools has emerged as an economically viable alternative to this type of operation. Thus, this study aims to evaluate the surface integrity to the AISI 4340, AISI 52100 and AISI D2 steels in six hardness values, machined with PCBN and carbide ultrafine grains tools. First were evaluated 2D and 3D roughness of the machined surfaces and it was found that hardness up to 50 HRC, both cutting tools showed similar behavior in terms of surface finish. However, above this value, the machining with carbide tool showed higher instabilities, generating surfaces with low functional performance. This behavior is associated with the geometry of the tool, the elevation of the components of the machining force and microstructural characteristics of materials. Subsequently, the microstructural changes were analyzed and it was found that the hardness is not decisive factor in the behavior of the machined surfaces, but the microstructure. Another feature observed in almost all tests is that the layer subject to change is too thin, a result that is associated with the cutting parameters and geometries of the tools. About materials, AISI 4340 and AISI 52100 steel showed white layer by phase transformation and the steel AISI D2 carbides shear. In the three materials was observed the occurrence of plastic deformation. Regarding the performance of cutting tools, the biggest changes were observed for steels from 55 HRC, machined metal-hard tool.

Keywords: Hard turning. Surface integrity. Surface roughness. Microstructural changes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Características das operações de torneamento de materiais endurecidos (TME) e retificação.....	30
Figura 2.2 – Mecanismo de formação de cavaco no torneamento de materiais endurecidos.....	32
Figura 2.3 - Morfologia dos cavacos em função da dureza do material e da velocidade de corte.....	33
Figura 2.4 - Comportamento da força de corte (F_c), da força passiva (F_p) e força de usinagem (F_u) do aço AISI 4340 ($v_c = 90$ m/min, $a_p = 0,15$ mm e $f = 0,9$ mm).....	34
Figura 2.5 – Efeito da dureza nas componentes da força de usinagem ($v_c = 130$ m/min, $a_p = 0,15$ mm e $f = 0,08$ mm/rev).....	35
Figura 2.6 – Microestrutura dos diferentes materiais usinados por torneamento de materiais endurecidos: a) aço AISI 4340, b) aço AISI 52100, c) aço AISI D2 e d) ferro fundido branco.....	37
Figura 2.7 - Comparação da microdureza dos carbonetos com a matriz dos aços.....	38
Figura 2.8 - Curva TTT do aço AISI 4340 com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr, 0,33% Mo.....	40
Figura 2.9 - Curva TTT do aço AISI 52100 com 1,05 % C, 0,36% Mn, 0,2% Si, 1,42% Cr.....	42
Figura 2.10 – Curva da temperatura de austenitização do aço AISI D2.....	44
Figura 2.11 – Micrografia do metal-duro a) de grãos ultrafinos e b) convencional.....	45
Figura 2.12 – Efeitos da alteração do tamanho médio dos grãos de ferramentas de metal-duro.....	46
Figura 2.13 – Ferramenta de metal duro com revestimento com cristais a) em posição aleatória e b) alinhados.....	47
Figura 2.14 – Geometrias típicas do gume da ferramenta segundo a norma DIN 6582, no plano de referência da ferramenta (Pr).....	49
Figura 2.15 - Perfis de gumes de ferramentas de corte.....	50
Figura 2.16 - Distribuição de tensões nas ferramentas com a) gume chanfrado e b) com gume arredondado.....	51
Figura 2.17 – Micro e macrogeometria da ferramenta de metal-duro.....	52
Figura 2.18 - Efeitos na textura da superfície e nas alterações microestruturais.....	54
Figura 2.19 - Comparação dos valores dos parâmetros de rugosidade obtidos pelo processo de retificação e de torneamento de materiais endurecidos.....	55

Figura 2.20 - Curva de Abbott- Firestone a) parâmetros gerados e b) curva de rugosidade com duplo filtro gaussiano.....	56
Figura 2.21 - Comparação das curvas de Abbott dos processos de retificação e de torneamento de materiais endurecidos.....	57
Figura 2.22 - Comparação do perfil skewness (Rsk) nos processos de retificação e torneamento de materiais endurecidos.....	58
Figura 2.23 - Topografia da superfície do aço AISI 52100 após processo de torneamento em condições a) suaves e b) abusivas.....	59
Figura 2.24 - Topografia da superfície do aço AISI 52100 após processo de retificação em condições a) suaves e b) abusivas.....	59
Figura 2.25 – Tipos de alterações microestruturais típicos nos processos de usinagem a) eletroerosão, b) torneamento, c) furação e d) eletroquímico.....	61
Figura 2.26 – Mecanismos de formação de camada branca no torneamento de materiais endurecidos.....	62
Figura 2.27 – Perfil de microdureza na subsuperfície.....	64
Figura 2.28 – Alteração microestrutural no torneamento do aço AISI 52100.....	65
Figura 2.29 - Conversão de energia no torneamento e na retificação, respectivamente.....	66
Figura 2.30 - Comportamento das tensões residuais após retificação e torneamento de materiais endurecidos.....	67
Figura 2.31 - Alterações na superfície do aço AISI 52100 após processo de torneamento com inserto a) convencional e b) <i>wiper</i>	68
Figura 2.32 - MEV da camada da subsuperfície do aço AISI 4340 após processo de torneamento.....	69
Figura 2.33 - Integridade da camada abaixo da superfície usinada do ferro fundido branco com elevado teor de cromo.....	70
Figura 3.1 - Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de torneamento.....	73
Figura 3.2 - Representação dos insertos de a) PCBN e b) metal-duro de grãos ultrafinos utilizados nos ensaios de torneamento.....	74
Figura 3.3 – Processo de medição das ferramentas de corte no Microscópio de Foco Infinito Alicona.....	75
Figura 3.4 – Perfil do inserto de a) PCBN e de b) metal-duro de grãos ultrafinos.....	76
Figura 3.5 – Porta-ferramenta com pastilha montada utilizado nos ensaios de torneamento.....	76
Figura 3.6 – Sistema de fixação utilizado no ensaio de torneamento.....	77
Figura 3.7 – Representação esquemática do corpo de prova utilizado nos ensaios.....	78

Figura 3.8 - Microestrutura do aço AISI 4340 nas durezas de a) 35, b) 40, c) 45, d) 50, e) 55 e f) 60 HRC.....	80
Figura 3.9 – Microestrutura do aço AISI 52100 nas durezas de a) 35, b) 40, c) 45, d) 50, e) 55 e f) 60 HRC.....	81
Figura 3.10 – Microestrutura do aço AISI D2 nas durezas de a) 35, b) 40, c) 45, d) 50, e) 55 e f) 60 HRC.....	81
Figura 4.1 – Conjunto de fixação do corpo de prova nos ensaios de torneamento.....	83
Figura 4.2 - Comparação dos valores dos parâmetros obtidos com diferentes valores de cut-off (λ_c).....	85
Figura 4.3 - Comparação dos perfis, respectivamente, de rugosidade e de ondulação, com cut-off (λ_c) de a) 0,80 mm, b) 0,25 mm e c) 0,08 mm.....	87
Figura 4.4 – Medição da rugosidade 2D.....	88
Figura 4.5 – Etapas para medição da rugosidade 2D.....	89
Figura 4.6 – Interferômetro de luz branca para medição de rugosidade 3D.....	90
Figura 4.7 - Perfis de rugosidade e ondulação, respectivamente.....	91
Figura 4.8 - Região alterada pelos efeitos térmicos do processo de eletroerosão.....	92
Figura 4.9 – Procedimentos de corte do corpo de prova.....	93
Figura 4.10 - Anomalias presentes durante a análise das camadas da subsuperfície.....	93
Figura 4.11 – Etapas da preparação metalográfica.....	95
Figura 4.12 – Análise do perfil do corpo de prova usinado.....	96
Figura 5.1 – Parâmetros de rugosidade 2D e 3D para as durezas de 35 e 40 HRC para o aço a) AISI 4340, b) AISI 52100 e c) AISI D2.....	98
Figura 5.2 – Parâmetros de rugosidade 2D e 3D para as durezas de 45 e 50 HRC para o aço a) AISI 4340, b) AISI 52100 e c) AISI D2.....	100
Figura 5.3 – Parâmetros de rugosidade 2D e 3D para as durezas de 55 e 60 HRC para o aço a) AISI 4340, b) AISI 52100 e c) AISI D2.....	102
Figura 5.4 – Comportamento da rugosidade R_z com a elevação dos valores de dureza para o aço a) AISI 4340, b) AISI 52100 e c) AISI D2.....	104
Figura 5.5 – Curvas de Abbott para o aço AISI 4340 com 35 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	105
Figura 5.6 – Curvas de Abbott para o aço AISI 52100 com 35 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	107
Figura 5.7 – Curvas de Abbott para o aço AISI D2 com 35 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	108

Figura 5.8 – Curvas de Abbott para o aço AISI 4340 com 45 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	110
Figura 5.9 – Curvas de Abbott para o aço AISI 52100 com 45 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	111
Figura 5.10 – Curvas de Abbott para o aço AISI D2 com 45 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	112
Figura 5.11 – Curvas de Abbott para o aço AISI 4340 com 55 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	114
Figura 5.12 – Curvas de Abbott para o aço AISI 52100 com 55 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	115
Figura 5.13 – Curvas de Abbott para o aço AISI D2 com 55 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	116
Figura 5.14 – Topografias geradas na usinagem do aço AISI D2 com 55 HRC.....	117
Figura 5.15 – Curvas de Abbott para o aço AISI 4340 com 60 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	118
Figura 5.16 – Curvas de Abbott para o aço AISI 52100 com 60 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	119
Figura 5.17 – Análise de planeza do corpo de prova do aço AISI 52100 com 60 HRC.....	120
Figura 5.18 – Curvas de Abbott para o aço AISI D2 com 60 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.....	121
Figura 5.19 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI 4340, usinado com ferramenta de PCBN.....	123
Figura 5.20 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI 4340, usinado com ferramenta de metal-duro.....	125
Figura 5.21 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI 52100, usinado com ferramenta de PCBN.....	127
Figura 5.22 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI 52100, usinado com ferramenta de metal-duro.....	129
Figura 5.23 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI D2, usinado com ferramenta de PCBN.....	131
Figura 5.24 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI D2, usinado com ferramenta de metal-duro.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das classes de materiais endurecidos.....	39
Tabela 2.2 – Composição química básica dos materiais (%em massa)....	39
Tabela 2.3 – Características das ferramentas de PCBN.....	48
Tabela 2.4 – Estimativa da energia dissipada nos processos de retificação e torneamento em materiais endurecidos.....	66
Tabela 3.1 – Características dos insertos de PCBN e metal-duro.....	76
Tabela 3.2 – Composição química dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2.....	79
Tabela 4.1 – Parâmetros de corte dos ensaios de torneamento.....	84
Tabela 4.2 – Variáveis de entrada do experimento.....	84
Tabela 4.3 – Condições de medição da rugosidade da superfície.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
<i>apud</i>	Citado por
ASM	<i>American Society for Metals</i>
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CERMAT	Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CTIF	Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
DIN	<i>Deutches Institut für Normung</i>
<i>et al.</i>	Mais de três autores
FAPESC	Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Classe de Tolerância
LABMAT	Laboratório de Materiais
LCM	Laboratório de Caracterização Microestrutural
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PCBN	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
TME	Torneamento de Materiais Endurecidos
TTT	Tempo – Temperatura – Transformação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNIFEBE	Centro Universitário de Brusque
USICON	Laboratório de Usinagem e Comando Numérico
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras maiúsculas

F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
F_p	[N]	Força passiva
F_t	[N]	Força de usinagem
Mr_1	[%]	Fração de contato mínima no núcleo do perfil de rugosidade
Mr_2	[%]	Maior fração de contato no núcleo do perfil de rugosidade
P_c	[W]	Potência de corte (Observar índice P_c)
$P_{c''}$	[W/mm ²]	Potência de corte específica
Pr	[-]	Plano de referencia
R_a	[μm]	Rugosidade aritmética
R_k	[μm]	Rugosidade do núcleo do perfil
R_p	[μm]	Rugosidade máxima do pico do perfil
R_{pk}	[μm]	Rugosidade média dos picos acima da área de contato mínima do perfil
R_q	[μm]	Rugosidade quadrática média
R_{sk}	[μm]	Rugosidade skewness
R_{Sm}	[μm]	Rugosidade média do espaçamento entre picos
R_t	[μm]	Rugosidade altura pico-vale
R_v	[μm]	Rugosidade máxima do vale do perfil
R_{vk}	[μm]	Rugosidade média dos vales abaixo da área de contato mínima do perfil
R_z	[μm]	Rugosidade média da altura pico-vale
S_a	[μm]	Rugosidade aritmética – 3D
Sk	[μm]	Rugosidade do núcleo do perfil – 3D
Sp_k	[μm]	Rugosidade média dos picos acima da área de contato mínima do perfil – 3D
St	[μm]	Rugosidade altura pico-vale – 3D
S_{vk}	[μm]	Rugosidade média dos vales abaixo da área de contato mínima do perfil – 3D
S_z	[μm]	Rugosidade média altura pico-vale – 3D
VB	[mm]	Desgaste de flanco

Letras minúsculas

a_p	[mm]	Profundidade de corte
e_c''	[J/mm ²]	Energia específica
Lr	[mm]	Comprimento de amostragem
Ln	[mm]	Comprimento da amostra
q_w''	[w/mm ²]	Quantidade de calor específica
t_c	[ms]	Tempo de contato
v_c	[m/min]	Velocidade de corte
Z	[μm]	Distância abaixo da superfície

Letras gregas

α	[°]	Ângulo de incidência
β	[°]	Ângulo de cunha
γ	[°]	Ângulo de saída
λ	[mm]	Comprimento de amostragem ou <i>cut-off</i>
ρ	[μm]	Raio do gume
σ	[Mpa]	Tensão residual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS	29
2.2 MATERIAIS ENDURECIDOS	36
2.2.1 Aço AISI 4340.....	39
2.2.2 Aço AISI 52100.....	41
2.2.3 Aço AISI D2.....	42
2.3 FERRAMENTAS DE CORTE.....	44
2.3.1 Metal-duro e Nitreto de Boro Cúbico Policristalino (PCBN). 45	
2.3.2 Geometria da ferramenta.....	48
2.4 INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE	52
2.4.1 Rugosidade.....	54
2.4.2 Alterações microestruturais	61
3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	73
3.1 PROCESSO DE TORNEAMENTO	73
3.2 FERRAMENTAS DE CORTE, PORTA-FERRAMENTA E SISTEMA DE FIXAÇÃO	74
3.3 CORPOS DE PROVA	77
3.4 MATERIAIS DO ENSAIO	78
4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	83
4.1 ENSAIOS DE TORNEAMENTO	83
4.2 ANÁLISE DAS RUGOSIDADES 2D E 3D	85
4.3 ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS.....	91
4.4 ANÁLISE DE PERIL	95
5 RESULTADOS	97
5.1 RUGOSIDADES 2D E 3D	97
5.2 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS.....	122

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	137
6.1 CONCLUSÕES.....	137
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
REFERÊNCIAS	141

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das etapas de manufatura de um componente mecânico, os processos de fabricação afetam diretamente o estado microgeométrico da superfície e as propriedades do material nas camadas da subsuperfície. Como exemplo, a temperatura gerada na interface cavaco-ferramenta no processo de torneamento de materiais endurecidos geralmente ultrapassa o limite de austenitização do material, sendo que, a porção de material aquecida é rapidamente resfriada pelo próprio volume não aquecido, pela rotação do componente usinado e pela atmosfera na máquina-ferramenta. Tal situação promove uma retêmpera (não revenimento) em uma região limitada abaixo da superfície. Situações como a descrita impactam diretamente no desempenho do componente, principalmente quanto à vida por fadiga, pois as regiões afetadas são propensas a nucleação e propagação de trincas [1, 2].

Aços endurecidos têm sido empregados na fabricação de engrenagens, rolamentos, matrizes e demais componentes críticos de engenharia, os quais necessitam de elevada resistência ao desgaste, o que torna ainda mais relevante o estudo da integridade da superfície. Um dos critérios para avaliar a condição da superfície usinada é o processo de remoção de material empregado [3]. No caso específico dos materiais endurecidos, quando se trata de operações de acabamento, o processo de torneamento está se tornando uma alternativa à retificação, reduzindo consideravelmente tempos e custos de fabricação [4].

As vantagens da aplicabilidade do processo de torneamento na indústria se referem, principalmente, à alta taxa de produção, à alta flexibilidade do processo, à elevada qualidade da superfície e à possibilidade de usinar sem meios lubrificarrefrigerantes, impactando positivamente tanto no setor financeiro quanto no ambiental [4]. E com o desenvolvimento das ferramentas de corte produzidas com materiais ultraduros aliado ao desenvolvimento de máquinas-ferramentas com elevada rigidez e estabilidade dinâmica, o torneamento tornou-se um processo capaz de atingir níveis de tolerâncias comparáveis ao processo de retificação, especialmente nas faixas de tolerância IT3 a IT6 [5].

Apesar das vantagens apresentadas pelo torneamento de materiais endurecidos, este processo ainda apresenta alguns aspectos não esclarecidos que acarretam certa hesitação por parte de muitas indústrias em adotá-lo como substituto definitivo ao processo de retificação [6], ou até mesmo, a simples adoção de um processo híbrido. Tais aspectos recaem principalmente sobre a qualidade da superfície obtida, o impacto

do processo nas alterações microestruturais, a geração de tensões residuais, a precisão dimensional e a geometria da peça usinada [7].

Durante muito tempo, as ferramentas de corte utilizadas para o processo de torneamento de materiais endurecidos limitaram-se às ferramentas de PCBN e de cerâmicas por essas possuem bom desempenho na usinagem destes materiais. Entretanto, os altos custos de produção das mesmas têm limitado seu campo de aplicação, especialmente em materiais com microestruturas isentas de carbonetos e aços de média dureza (30-50 HRC).

Diante deste cenário, as ferramentas de metal-duro apresentaram-se como uma alternativa economicamente viável, e com o desenvolvimento de novas classes associado a novos materiais e tecnologias de revestimento têm conseguido ocupar espaço neste tipo de operação. Além disso, o aprimoramento de ferramentas com grãos menores que 1 μm têm garantido um melhor desempenho na usinagem de materiais endurecidos, por possuírem valores superiores de dureza, maior resistência do gume e tenacidade, aliados a baixa tendência à aderência e ao desgaste por difusão.

O objetivo principal deste trabalho é analisar a integridade da superfície na usinagem de aços endurecidos submetidos ao processo de torneamento com ferramentas de PCBN e metal-duro de grãos ultrafinos. Desta forma, pretende-se verificar as possibilidades e limitações de aplicabilidade destas ferramentas a este tipo de operação, discutir o comportamento da rugosidade obtida para diferentes materiais, avaliar o desempenho funcional das superfícies obtidas, bem como apontar as alterações na integridade da superfície ocasionadas pelo processo de torneamento, de modo a elencar os fatores determinantes neste aspecto.

Para a concretização deste estudo, primeiramente serão realizadas as análises das rugosidades 2D e 3D, com a finalidade de avaliar as condições de acabamento, bem como as características tribológicas das peças usinadas. Posteriormente, os corpos de prova serão seccionados e submetidos à preparação metalográfica, com o intuito de serem realizadas as análises das alterações microestruturais. Como materiais dos ensaios, serão preparados corpos de prova dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2. A escolha destes aços está relacionada a sua grande aplicabilidade no meio industrial, bem como a presença de microestruturas distintas, possibilitando avaliar o desempenho das duas ferramentas na usinagem de materiais com características distintas.

Este projeto foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Também foi utilizada a infraestrutura de outros laboratórios desta

universidade, como o Laboratório de Materiais (LABMAT), o Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT), o Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM), o Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) e o Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON). Contou-se também com a colaboração do Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação (CTIF), do Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE).

O projeto em questão teve suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) na Chamada Pública FAPESC Nº 01/2014 - PROGRAMA UNIVERSAL – no projeto “Usinagem de materiais endurecidos com ferramentas de metal-duro” e está inserido num universo de demais trabalhos sobre a temática do torneamento de materiais endurecidos e que integram as pesquisas desenvolvidas pelo Grupo de Usinagem de Materiais Endurecido (GUME).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

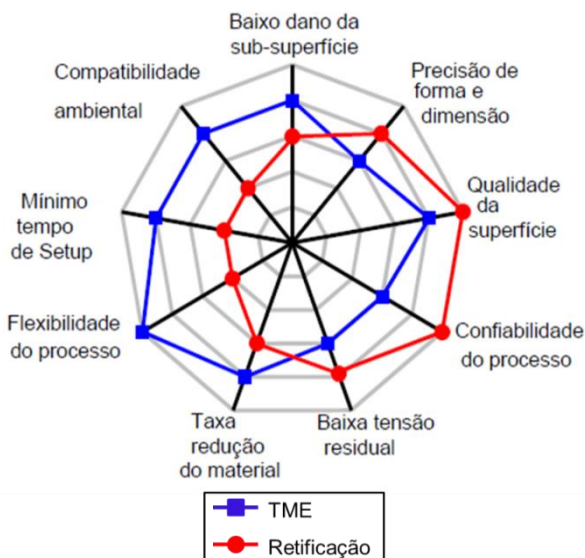
Neste tópico foram descritas as principais variáveis que influenciam a integridade da superfície de materiais endurecidos quando submetidos ao processo de torneamento. Desta forma, inicialmente foi analisado o torneamento de materiais endurecidos, construindo-se paralelos com a retificação e abordando aspectos inerentes ao processo, como força de usinagem e mecanismo de formação de cavacos. Posteriormente, foram estudados os aços empregados neste trabalho e as ferramentas de PCBN e metal-duro de grãos ultrafinos, abordando-se seus constituintes, propriedades e condições geométricas. Por fim, foram feitas considerações relativas à integridade da superfície, a fim de verificar a importância da análise da rugosidade e das alterações microestruturais no desempenho dos componentes.

2.1 TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS

Com a crescente demanda por inovações nos processos produtivos e a necessidade de materiais que atendam a requisitos como bom desempenho, geometrias precisas e resistência ao desgaste e às tensões, a usinagem de materiais endurecidos está assumindo um grande destaque no meio acadêmico e industrial [8], tendo em vista que é uma tecnologia de fabricação capaz de realizar processos de acabamento e semi-acabamento em materiais de alto desempenho, como os aços endurecidos para construção mecânica, aços para rolamentos, aços-ferramenta e inclusive os ferros fundidos brancos [9].

Até o início da década de 1980, para realizar as operações de acabamento, componentes em materiais endurecidos eram submetidos ao processo de retificação para atingir tolerâncias dimensionais desejadas [10]. Nesta mesma época, o desenvolvimento de máquinas-ferramentas com elevada rigidez e estabilidade mecânica, associadas às ferramentas de materiais ultraduros, permitiram que o torneamento de materiais endurecidos fosse uma alternativa ao processo de retificação [11]. A Figura 2.1 apresenta uma comparação entre os processos de retificação e de torneamento, de modo que se possa verificar o grau de relevância de cada aspecto elencado.

Figura 2.1 - Características das operações de torneamento de materiais endurecidos (TME) e retificação.



FONTE: Adaptada de Klocke, Brinksmeier e Weinert [4].

Comparando-se os dois processos, em que os pontos próximos à periferia correspondem aos melhores resultados, observa-se que o torneamento apresenta diversas vantagens, como a alta taxa de remoção de material, maior flexibilidade do processo e a possibilidade de usinar geometrias complexas. Outra vantagem refere-se aos custos dos equipamentos utilizados na operação, já que centros de torneamento normalmente apresentam valores menores que as retificadoras.

O menor dano na camada abaixo da superfície gerada pelo torneamento deve-se à menor área e tempo de contato da ferramenta com a peça. Quando comparado com a retificação, o torneamento é uma operação mais rápida, pois uma maior parcela da geometria da peça pode ser usinada em uma única preparação de máquina e o tempo de troca de ferramentas é menor que o de rebolos [12, 4]. Além disto, uma série de características do torneamento de materiais endurecidos pode reduzir o impacto ambiental bem como os custos do processo, já que tem a possibilidade de ser realizado a seco, o consumo de energia elétrica pelos

centros de torneamento é menor e os cavacos resultantes podem ser facilmente reciclados.

Já o processo de retificação possui maior confiabilidade, melhor precisão de forma, qualidade da superfície e baixas tensões residuais [13, 14, 5].

Apesar das vantagens apresentadas pelo torneamento na usinagem de materiais endurecidos quanto a flexibilidade e aspectos ecológicos, este processo ainda apresenta pontos obscuros os quais são os fatores para que ainda haja hesitação por parte de muitas indústrias em adotar este processo como substituto definitivo à retificação [6]. Os principais receios recaem sobre a qualidade da superfície obtida, alterações microestruturais e tensões residuais, além da precisão dimensional e geométrica do componente usinado.

Na literatura existem diversos conceitos que definem o torneamento de materiais endurecidos, sendo que a mais difundida descreve que o processo é caracterizado quando a dureza do material usinado encontra-se acima de 45 HRC [8, 13, 15]. Entretanto, Klocke e König [16] afirmam que este processo somente ocorre quando se processa materiais com dureza superior a 50 HRC. Outra definição bastante coerente, elaborada por Poulachan, Moisan e Jawahir [17], não está relacionada diretamente à dureza do material, mas sim quando este ultrapassa o limite de resistência à tração em aproximadamente 1700 MPa.

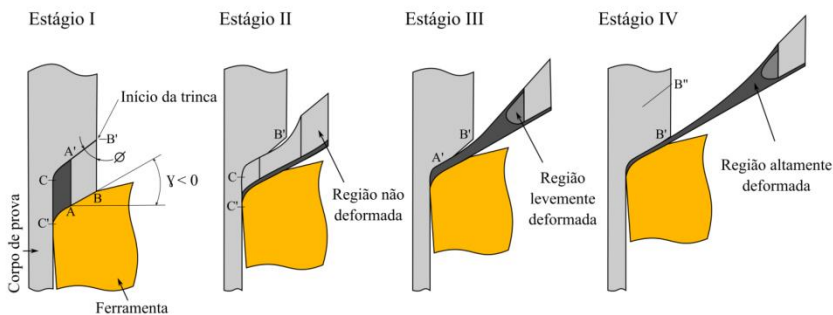
Assim, pode-se afirmar que a diferença básica entre o torneamento de materiais endurecidos e o torneamento convencional consiste essencialmente na dureza da peça a ser usinada e na ferramenta de corte – material e geometria – empregada, situação que acarreta em um novo fenômeno para a formação de cavacos.

Enquanto que na usinagem de materiais dúcteis, a formação do cavaco é acompanhada por uma severa deformação plástica, originando cavacos do tipo contínuo, na usinagem de materiais endurecidos é a fratura o mecanismo responsável pela formação de cavacos. Esses são gerados em formato lamelar, porém denominados dentes de serra. Isso se deve, principalmente, às próprias características destes materiais, pelo fato de apresentarem maior tensão de cisalhamento, sendo que a pequena deformação na zona plástica promove a alteração do mecanismo de fratura [15].

A teoria das trincas periódicas, proposta por Shaw e Vyas [18], descreve o mecanismo de formação de cavacos no torneamento de materiais endurecidos. Ela afirma que trincas são nucleadas na superfície

do material e tendem a se propagar ao longo do plano de cisalhamento até a região do gume da ferramenta.

Figura 2.2 – Mecanismo de formação de cavaco no torneamento de materiais endurecidos.



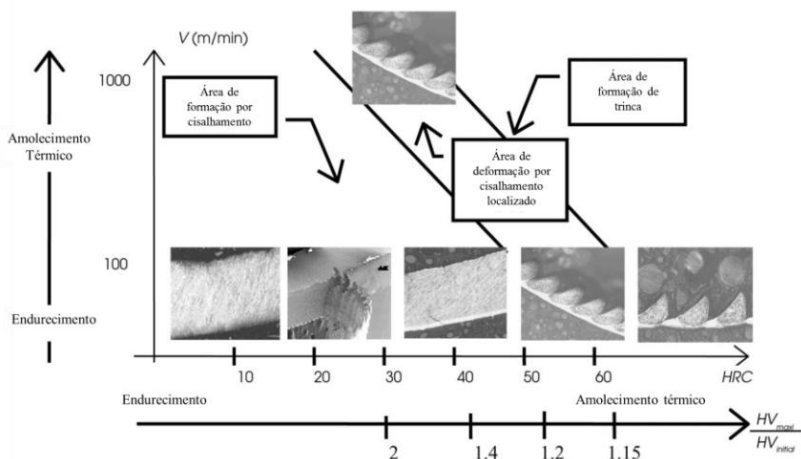
FONTE: Adaptada de Poulachon e Moisan [19].

A Figura 2.2, esquema desenvolvido por Poulachon e Moisan [19], representa os estágios de formação do cavaco dente de serra. No estágio I, quando é iniciado o processo de remoção de material, tensões de compressão são geradas no gume da ferramenta de corte, bem como há a formação de uma trinca na superfície do corpo de prova, que se propaga até a região do gume. Verifica-se no estágio II, que o volume de cavaco AA'BB' (estágio I), localizado entre a trinca e o gume da ferramenta é expulso sem ocorrer deformação. Além disso, o segmento AA' é reduzido progressivamente com o movimento da ferramenta, gerando a redução da espessura do cavaco. Nesta etapa pode também ocorrer a formação de camada branca, devido à elevação do atrito e dos gradientes de temperatura [20].

A parcela do cavaco que não foi eliminado sem sofrer deformação, devido aos aumentos de velocidade, atrito e temperatura, é submetida a elevada taxa de deformação plástica. Assim, no estágio III observa-se a formação de uma região mais estreita, a qual ficará aderida à lamela que se formará no próximo ciclo. Por fim, no estágio IV a lamela do cavaco é formada e a tensão atuante no gume da ferramenta é suficiente para provocar a geração de uma nova trinca, reiniciando o processo.

Poulachon, Moisan e Jawahir [21] analisaram o comportamento do mecanismo de formação de cavaco em um aço AISI 52100, quando são variados os parâmetros de dureza (10-62 HRC), conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3 - Morfologia dos cavacos em função da dureza do material e da velocidade de corte.



FONTE: Adaptada de Poulachon, Moisan e Jawahir [21].

Durante os experimentos foram observados dois tipos distintos de mecanismo de formação de cavaco. Os aços com durezas variado entre 10 a 50 HRC, geraram cavacos classificados morfologicamente como contínuos, sendo a deformação plástica o mecanismo predominante na região de cisalhamento.

A partir de 50 HRC, os cavacos formados são do tipo dente de serra. Os cavacos são submetidos a elevada deformação e altas temperaturas são geradas na zona de cisalhamento, sendo que a formação de camada branca é um reflexo de tais fenômenos. Quando a dureza aumenta, dois fatores conflitantes afetam o mecanismo de corte.

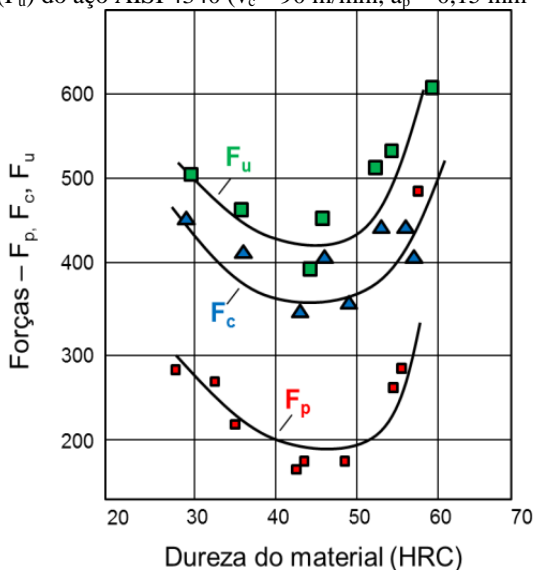
O primeiro é o aumento da tensão de escoamento devido ao aumento da dureza do aço e o segundo é a redução da tensão de escoamento devido as elevadas temperaturas de corte. Assim, quando o material endurecido é usinado, a deformação na ruptura torna-se menor, nucleando a trinca por meio da tensão de compressão promovida pelo gume da ferramenta (Estágio I - Figura 2.2). A partir de determinado limite, quando a tensão de escoamento é reduzida pelo amolecimento térmico, ocorrem os estágios II e III (Figura 2.2). Ou seja, nucleação de trincas seguido do cisalhamento adiabático localizado [20].

Avaliando a influência da dureza do material no mecanismo de formação de cavaco, verifica-se que para materiais não endurecidos, o

mecanismo principal de formação é o cisalhamento seguido por deformação plástica, gerando assim, cavacos do tipo contínuo. Já para os materiais com durezas superiores a 60 HRC, o mecanismo predominante é a fratura provocada pela nucleação e propagação das trincas. Entretanto, existe uma região de transição entre cavacos contínuos e dentes de serra, em que não se pode descartar a existência de outro tipo de mecanismo de formação.

Apesar da elevada dureza e consequente elevada resistência mecânica dos materiais usinados por este processo, em função dos parâmetros utilizados, as componentes da força de usinagem não são necessariamente altas [22]. Porém, a força específica, esta sim é elevada, podendo atingir valores superiores a 4000 N/mm² [6]. A Figura 2.4 mostra o comportamento da força de corte, da força passiva e da força resultante (força de usinagem) no torneamento de materiais endurecidos.

Figura 2.4 - Comportamento da força de corte (F_c), da força passiva (F_p) e força de usinagem (F_u) do aço AISI 4340 ($v_c = 90$ m/min, $a_p = 0,15$ mm e $f = 0,9$ mm).



FONTE: Matsumoto, Barash e Liu [23].

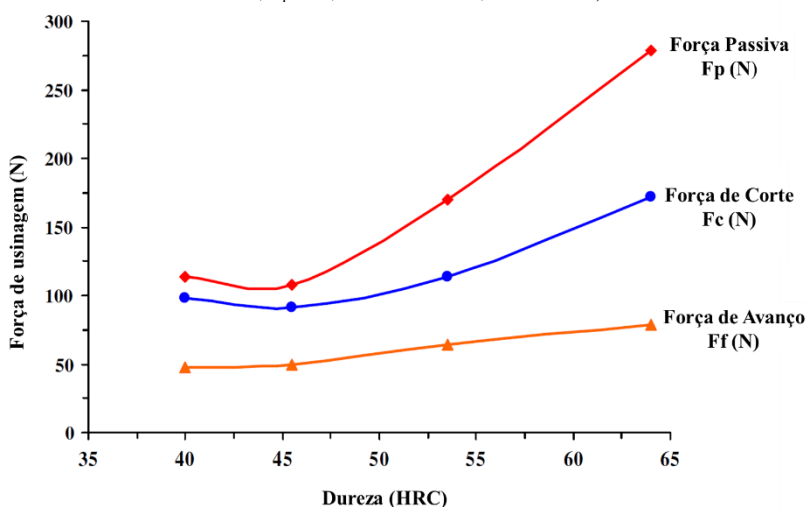
Partindo da Figura 2.4, pode-se observar a presença de uma região de inflexão entre as durezas de 40 e 50 HRC, denotando que as componentes da força de usinagem e a distribuição de tensões na área de contato são significativamente influenciadas pela dureza do material da

peça de trabalho [23]. Este fenômeno pode ser explicado pelo aumento da resistência mecânica devido ao aumento da dureza do material, o qual provoca a elevação da temperatura na interface cavaco-ferramenta e, consequentemente, a redução da resistência ao cisalhamento [24].

Quando a dureza da peça excede 50 HRC, há a tendência de uma elevação drástica das componentes das forças de usinagem. Esse aumento é ocasionado tanto pelo aumento da resistência mecânica do material quanto pelo aumento da força de atrito na região e, consequentemente, há um aumento das componentes da força [24].

Bouacha *et al.* [25] realizaram um experimento utilizando o aço AISI 52100 e obtiveram um gráfico com um comportamento similar ao da Figura 2.4.

Figura 2.5 – Efeito da dureza nas componentes da força de usinagem ($v_c = 130$ m/min, $a_p = 0,15$ mm e $f = 0,08$ mm/rev).



FONTE: Bouacha *et al.* [25].

No gráfico da Figura 2.5, pode-se observar que o aumento das durezas provoca o aumento das componentes da força de usinagem. Enquanto a força passiva (F_p) é a componente de maior valor e a mais sensível à variação de dureza da peça de trabalho, as forças de corte (F_c) e de avanço (F_f) apresentam um crescimento gradual, porém menor quando comparado com a força passiva (F_p). Isto ocorre devido a evolução da resistência do material usinado e a utilização de um ângulo de saída negativo da ferramenta [25].

Segundo Suresh, Basavarajappa e Samuel [26] e Arsecularatne *et al.* [27], quando se trata das forças de avanço e das forças passivas, a geometria da ferramenta é um fator de grande influência. No caso específico do corte de materiais endurecidos, o uso de ângulos negativos de saída e de inclinação pode contribuir com a elevação das componentes da força. Além disso, grandes raios do gume associados a baixas profundidades de corte promovem a elevação da força passiva. Por outro lado, o aumento do raio de gume e do raio de quina garantem um aumento da qualidade da superfície e maior controle da vibração que atua na ferramenta de corte [26, 27].

Para que seja possível analisar a integridade da superfície de materiais endurecidos submetidas ao torneamento, de modo a garantir aos componentes condições ideais de aplicação, é necessário uma ampla compreensão dos fenômenos que atuam diretamente neste processo.

Verifica-se que as variações das componentes da força de usinagem e da dureza do material, bem como diferentes mecanismos de formação de cavaco afetam diretamente a qualidade da superfície obtida, bem como a ocorrência de efeitos mecânicos e térmicos nas camadas abaixo da superfície.

Entretanto, estes fenômenos também estão condicionados às características dos materiais usinados. Assim, a seguir serão apresentados os aços que serão utilizados nos ensaios deste trabalho, abordando suas características, microestruturas e propriedades.

2.2 MATERIAIS ENDURECIDOS

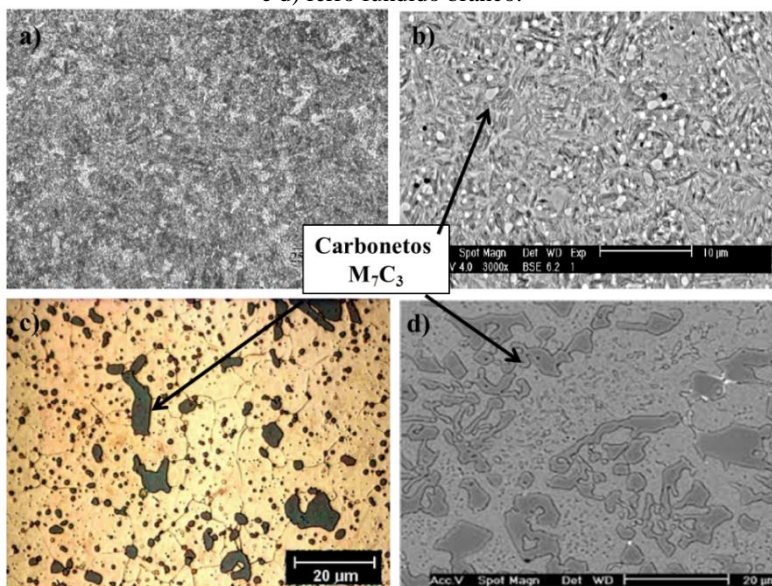
Dentre os materiais que possuem elevada dureza e com capacidade de serem usinados pelo processo de torneamento, encontram-se os aços para rolamentos, aços para construção mecânica, aços-ferramenta, os ferros fundidos brancos e demais ligas de ferros fundidos [28, 29]. Apesar de encontrarem-se dentro de um mesmo grupo de materiais, seus comportamentos na usinagem diferem devido as particularidades da microestrutura, principalmente no que tange a presença de partículas duras, como carbonetos [30, 31].

Operações de acabamento em materiais endurecidos ocorrem geralmente em aços para rolamento (AISI 52100) e aços para construção mecânica (AISI 4340 e AISI 8640). Isso se deve principalmente à confiabilidade do processo, já que a taxa de desgaste das ferramentas é conhecida e alterações no processo praticamente não são identificadas. Esta estabilidade no processo é possível devido a rigidez do sistema de usinagem e da homogeneidade microestrutural dos materiais, os quais não

apresentam carbonetos primários, ou tais carbonetos são relativamente pequenos, como no caso do aço AISI 52100.

Tal comportamento já não é esperado na usinagem de aços-ferramenta para trabalho a frio e ferro fundido branco, pois esses materiais apresentam altas frações de partículas duras em suas microestruturas, o que acarreta elevadas taxas de desgaste abrasivo, microlascamentos e quebras no gume da ferramenta de corte. Ou seja, tais carbonetos podem induzir à falha repentina da ferramenta. Deste modo, a capacidade real do processo torna-se limitada [28, 31, 29, 30]. A Figura 2.6 compara a diferença entre as microestruturas desses materiais.

Figura 2.6 – Microestrutura dos diferentes materiais usinados por torneamento de materiais endurecidos: a) aço AISI 4340, b) aço AISI 52100, c) aço AISI D2 e d) ferro fundido branco.



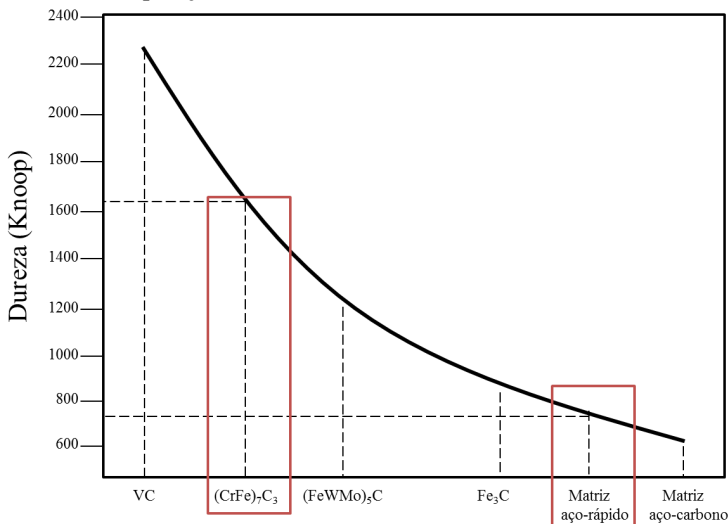
FONTE: Adaptada de Ranieri [32], Villares Rolls [33], Maru [34] e Franco Júnior [35].

A partir da Figura 2.6, observa-se que ocorre um aumento da concentração de carbonetos do tipo M_7C_3 na microestrutura dos materiais. O aço AISI 4340 é constituído por duas fases: martensita e bainita, sem a presença de partículas duras. Já os aços AISI 52100 e AISI D2 são também compostos por uma estrutura martensítica, mas diferem por apresentarem carbonetos de cromo em sua microestrutura, entretanto com

variação da fração volumétrica e de tamanho. Por fim, o ferro fundido branco é composto por matriz austenítica e com teor mais elevado de carbonetos dentre os quatro materiais citados [35, 34, 32, 28].

Avaliando a Figura 2.7 é possível observar que os carbonetos de cromo presentes nos materiais da Figura 2.6-b,c,d apresentam valor de microdureza quase três vezes maior que a matriz de aço-rápido (típica matriz martensítica).

Figura 2.7 - Comparação da microdureza dos carbonetos com a matriz dos aços.



FONTE: Adaptada de Roberts, Krauss e Kennedy[36].

Apesar do uso de ferramentas com durezas superiores às apresentadas, na usinagem de materiais endurecidos, o impacto dos carbonetos contra o gume da ferramenta pode provocar severos desgastes ou avarias, comprometendo a qualidade do acabamento da superfície usinada e até mesmo induzindo alterações microestruturais [30, 36].

Para melhor compreensão das propriedades de cada material e a influência da presença de carbonetos na microestrutura, adota-se a classificação proposta por Boing [28], conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação das classes de materiais endurecidos.

Classes	Material base	Estimativa da fração volumétrica dos carbonetos	Fração volumétrica de carbonetos nas classes
Classe A	AISI 4340	0%	Menor que 1%
Classe B	AISI 52100	≈ 4%	Entre 1 e 5%
Classe C	AISI D2	≈ 10%	Entre 5 e 15%
Classe D	FoFo de alto teor de cromo	≈ 25%	Maior que 15%

FONTE: Boing [28].

A presença de carbonetos nas microestruturas desses materiais está relacionada aos elementos constituintes de cada um, principalmente no que tange aos teores de carbono e cromo. A composição química dos aços da Figura 2.6–a,b,c – constam na tabela 2.2. Foi dada ênfase nesses três materiais, devido a aplicação dos mesmos na concretização deste trabalho.

Tabela 2.2 – Composição química básica dos materiais (% em massa).

Material	C	Cr	Mo	Si	V	Mn	Ni
Aço AISI 4340	0,38	0,70	0,20	0,15	-	0,6	1,65
	0,43	0,90	0,30	0,35		0,8	2,00
Aço AISI 52100	0,98	1,30	-	0,15	-	0,24	-
	1,10	1,60		0,35		0,45	
Aço AISI D2	1,40	11,0	0,70	0,60	1,10	0,60	0,30
	1,60	13,0	1,20	máx	máx	máx	máx

FONTE: Metals-Handbook [37].

A diferença de composição química e de microestruturas são fatores que influenciam diretamente as condições do processo de usinagem, bem como a qualidade de acabamento da superfície obtida. Desta forma, a seguir serão analisadas as características, microestruturas e propriedades dos aços que serão utilizados neste trabalho.

2.2.1 Aço AISI 4340

O desenvolvimento da indústria aeronáutica e aeroespacial criou a demanda para aços de ultra-resistência, com tensão de escoamento superior a 1400 MPa, tenacidade, resistência à fadiga e soldabilidade

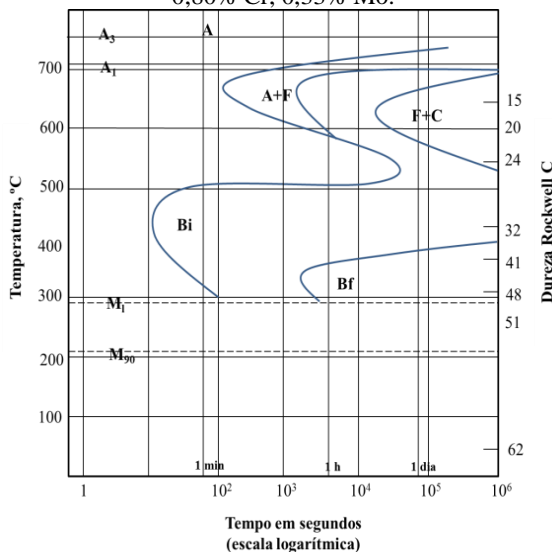
aceitáveis [37]. Neste cenário o aço AISI 4340 desponta como uma alternativa viável por conseguir abarcar as propriedades requeridas.

Por apresentar boas propriedades mecânicas é usualmente empregado nas indústrias automotiva, aeronáutica e marítima onde há severas condições de trabalho, sendo que suas aplicações típicas incluem engrenagens, eixos e trens de pouso [38].

Além da elevada resistência mecânica e tenacidade, este aço apresenta também elevada temperabilidade, resistência a fluência e resistência a fadiga. Apesar de todas estas vantagens, este aço sofre de susceptibilidade à corrosão, que é um dos mecanismos mais comuns de falha em aços [39].

A realização de tratamento térmico, para a obtenção de diferentes durezas, não somente altera as propriedades do material, como também a sua microestrutura. A Figura 2.8 inclui faixas de dureza Rockwell, o que permite estimar com alguma precisão os microconstituintes do aço AISI 4340.

Figura 2.8 - Curva TTT do aço AISI 4340 com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr, 0,33% Mo.



FONTE: Metals-Handbook [37].

A partir Figura 2.8, pode-se observar que para 55 e 60 HRC a microestrutura do AISI 4340 é quase que completamente constituída por martensita. Embora o aço AISI 4340 seja um aço comumente usado no

estado martensítico, para aplicações em partes-membros de máquinas, o mesmo não proporciona combinações vantajosas de resistência, ductilidade e tenacidade [40]. Conhecida por conferir um alto nível de resistência a um aço, a estrutura martensítica é raramente usada em uma condição não revenida, por causa de um grande nível de tensões internas associadas às transformações que causam perda na ductilidade, sendo esta estrutura frágil. Então, como uma possibilidade de alcançar e manter um bom nível de resistência e de ductilidade, sequencialmente, realiza-se o revenimento da estrutura martensítica com o intuito de aliviar as tensões internas geradas pelo processo de têmpera [41].

Já para 50 e 55 HRC, a martensita começa a aparecer com menor frequência e começa-se a observar a formação de bainita, que é composta por cementita e ferrita. Investigações com aços AISI 4340 de alta resistência e baixa liga mostram que microestruturas constituídas de bainita-martensita, com morfologias específicas e em proporções adequadas, demonstram, em certos casos, uma melhor combinação de resistência e ductilidade quando comparadas ao comportamento destes aços em uma condição completamente martensítica [42, 43].

Entre 35 e 50 HRC a estrutura passa a ser composta por bainita quase que completamente, tendo a presença desta mais acentuada para durezas inferiores, sendo denominada também por bainita superior. Além disso, pode também vir a ocorrer a presença de austenita retida. Para durezas de 35 e 30 HRC, a bainita começa a reduzir suas proporções na microestrutura do aço e a austenita retida está presente em maiores níveis [31, 44].

2.2.2 Aço AISI 52100

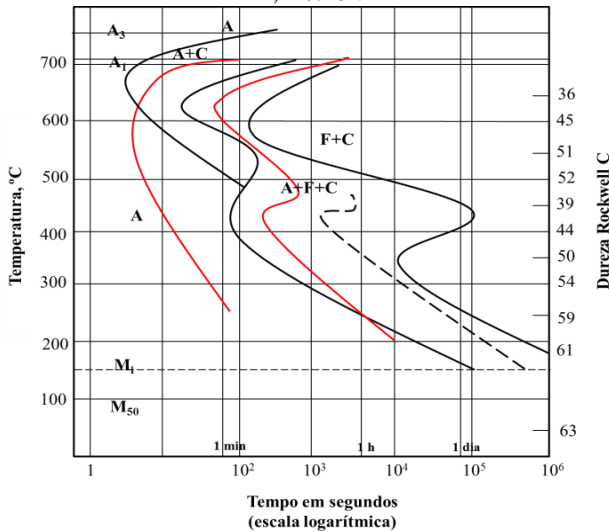
Quando em contato, duas superfícies tendem a sofrer desgaste, fenômeno que resulta na deformação gradual das peças e, conseqüentemente na modificação de suas dimensões. Peças utilizadas em condições de movimento, como rolamentos e mancais, estão constantemente susceptíveis ao desgaste, porém, este pode ser minimizado com o uso de materiais que apresentam uma matriz tenaz com a presença de partículas duras.

Dentre estes aços figura com destaque o aço AISI 52100, por seu uso, em especial, na fabricação de rolamentos [45]. Este material apresenta como principais propriedades a elevada resistência ao desgaste, estabilidade dimensional em condições extremas de temperatura e capacidade de suportar altas tensões de contato [46, 47]. O teor de

carbono e cromo associado a presença de carbonetos eutéticos na matriz deste aço permite que tais propriedades sejam alcançadas.

Para melhorar as propriedades mecânicas do aço AISI 52100, principalmente a resistência ao desgaste, utiliza-se tratamento térmico de têmpera e revenimento, o qual provoca alterações na microestrutura do material. A Figura 2.9 apresenta essas alterações e a correlacionam com valores de dureza.

Figura 2.9 - Curva TTT do aço AISI 52100 com 1,05 % C, 0,36% Mn, 0,2% Si, 1,42% Cr.



FONTE: Metals-Handbook [37].

Verifica-se que para valores de dureza entre 35 e 40 HRC, a microestrutura deste aço é composta principalmente por bainita [37], havendo a presença, ainda que reduzida, da austenita.

Entretanto, para valores entre 40 e 65 HRC, há a presença tanto da bainita quanto da martensita, esta em maiores proporções. A obtenção de uma microestrutura martensítica, com uma fina distribuição de carbonetos, proporciona alta resistência mecânica, característica exigida para a aplicação em rolamentos [47].

2.2.3 Aço AISI D2

Os aços-ferramenta para trabalho a frio estão entre os mais importantes na classificação de aços-ferramenta devido a sua

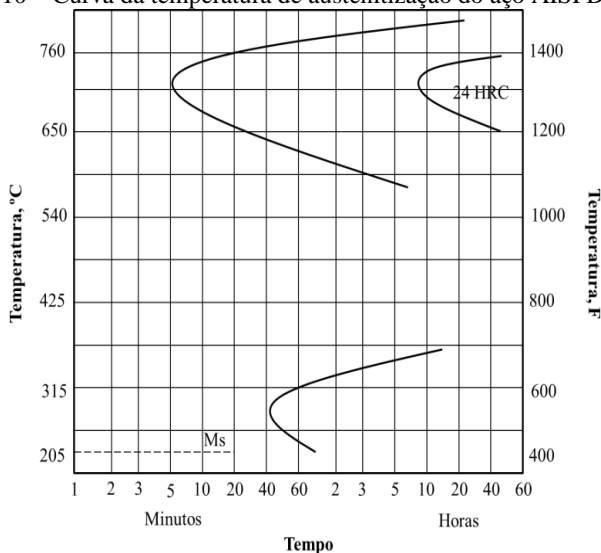
aplicabilidade em diversos tipos de estampos e matrizes. Esses materiais, com elevados teores de carbono e cromo, entre eles o aço AISI D2, foram desenvolvidos inicialmente como possíveis substitutos para o aço rápido, entretanto não possuíam dureza a quente suficiente, ao mesmo tempo em que se apresentaram muito frágeis para este propósito. No entanto, devido à elevada resistência ao desgaste promovida pela presença de carbonetos eutéticos e sua alta resistência ao impacto, mostraram-se promissores para a fabricação de matrizes [48, 49].

O aço AISI D2 trata-se de um aço com altos teores de carbono e cromo e possui como principais propriedades elevadas temperabilidade, resistência mecânica e resistência ao desgaste. Entretanto, a tenacidade deste aço é fortemente dependente da distribuição dos carbonetos eutéticos tipo M_7C_3 . Esta dependência é de particular importância à medida que a dimensão do material de partida deve ser adequada à dimensão final da ferramenta, principalmente quando a matéria prima é proveniente de material cortado em distribuidores [50, 51].

A composição química dos aços ferramenta pode variar muito, desde aços de baixa liga até aços altamente ligados. Contudo, o que diferencia tal classe de materiais dos aços convencionais são o processo de manufatura especial e as significativas modificações de propriedades após os tratamentos térmicos, sendo os mais usuais a têmpera e o revenimento, que propiciam dureza e propriedades mecânicas adequadas para a maioria das aplicações [50].

A despeito das características destes processos, variáveis fundamentais relacionadas à têmpera e ao revenimento afetam as propriedades metalúrgicas finais do aço AISI D2, principalmente no que se refere ao endurecimento, teor de austenita e a resistência à fratura. A Figura 2.10 apresenta a curva da temperatura de austenitização do aço AISI D2.

Figura 2.10 – Curva da temperatura de austenitização do aço AISI D2.



FONTE: Roberts, Krauss e Kennedy [36].

As principais variáveis a serem consideradas são a temperatura de austenitização e a temperatura de revenimento, já que são esses fatores que definem a quantidade de carbono e elementos de liga dissolvidos na austenita e presentes sob a forma de carbonetos, além, evidentemente, do tamanho de grão austenítico. Assim, a temperabilidade, a quantidade de austenita retida e o comportamento no revenimento são fundamentalmente alterados pelos parâmetros de austenitização [50, 51].

Como foi observado, as microestruturas e propriedades dos aços estudados estão diretamente relacionadas aos processos de tratamento térmico pelos quais são submetidos para alcançarem as durezas desejadas. Além disso, os três materiais apresentam características bem distintas, o que afeta diretamente o comportamento dos mesmos no processo de usinagem. Assim, a seguir serão analisadas as ferramentas de corte empregadas no torneamento desses três aços e quais condições são determinantes no desempenho das mesmas.

2.3 FERRAMENTAS DE CORTE

O desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte aliado a novas tecnologias de revestimento foram fatores que permitiram a aplicação do processo de torneamento em materiais endurecidos,

especificamente os aços. Este tipo de operação, em especial, é realizado com ferramentas de cerâmica e PCBN, as quais possuem propriedades adequadas para suportar as condições tribológicas impostas à operação.

Com o desenvolvimento de métodos de alteração dos substratos das ferramentas, diminuição do tamanho médio de grão para ordens nanométricas como também a orientação unidirecional da estrutura cristalina do revestimento, torna-se possível utilizar ferramentas de metal-duro na usinagem de materiais endurecidos [8, 13, 15].

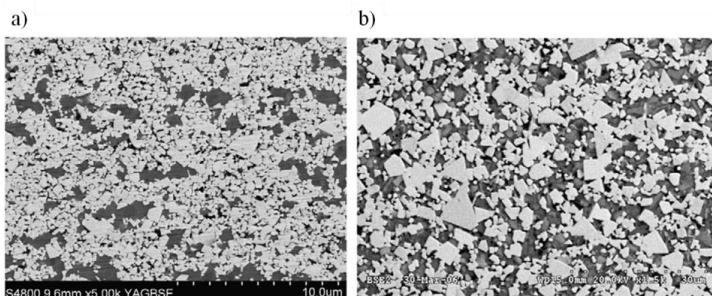
2.3.1 Metal-duro e Nitreto de Boro Cúbico Policristalino (PCBN)

O metal-duro é um material compósito, o qual permite uma combinação única de dureza, tenacidade, módulo de elasticidade e resistência à compressão, o que possibilitou a sua inserção em diversos setores industriais, como em ferramentas de corte, matrizes etc.

Este material geralmente consiste de uma fase de elevada dureza, onde se aplicam principalmente partículas de carbonetos, envolvida por uma fase ligante metálica e tenaz. Como essas duas fases podem ser compostas por diferentes materiais, as ferramentas de metal-duro podem apresentar diversas composições e, consequentemente, distintas aplicações e propriedades.

O metal-duro convencional apresenta cobalto como fase ligante, geralmente na faixa de 3 a 30% em massa do compósito e carboneto de tungstênio com fase de alta dureza, com tamanhos de grãos que podem variar desde níveis submicrométricos até poucos micrometros [52, 53, 54], como pode ser visto na Figura 2.11.

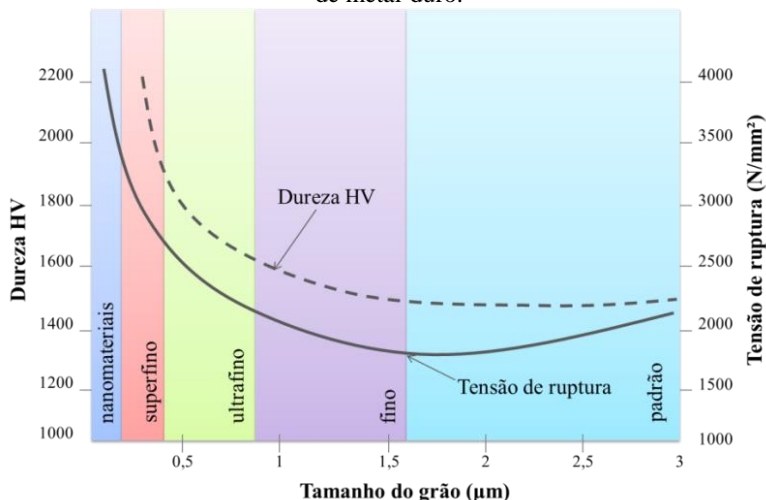
Figura 2.11 – Micrografia do metal-duro a) de grãos ultrafinos e b) convencional.



FONTE: Xiong *et al.* [55].

Além disso, atualmente já existem tecnologias que alteram o substrato das ferramentas e diminuem o tamanho médio de grãos para ordens nanométricas, permitindo elevar significativamente a dureza e a resistência mecânica das ferramentas de corte, como pode ser visto na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Efeitos da alteração do tamanho médio dos grãos de ferramentas de metal-duro.

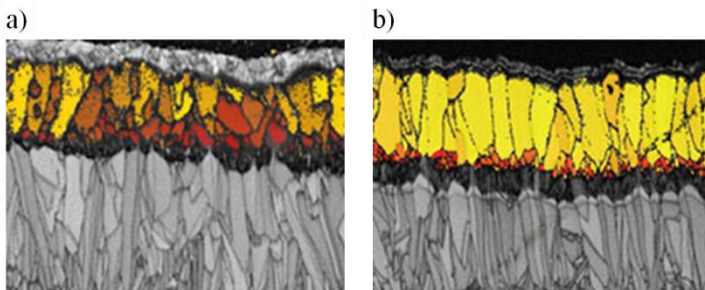


FONTE: Adaptada de Christoffel *apud* Rodrigues [56].

A Figura 2.12, mostra que quanto menor o tamanho do grão, maior será a dureza da ferramenta de corte. Além disto, a redução do tamanho do grão diminui a condutividade térmica, o que sugere menor afinidade química e possibilita maior resistência ao gume em função da maior dureza [20, 16, 57].

Juntamente com estes avanços no campo dos materiais para ferramentas de corte, o desenvolvimento de novos métodos de revestimento de ferramentas de corte, como a orientação unidirecional da estrutura cristalina nas camadas de cobertura com alumina (Figura 2.13), tem contribuído para o aperfeiçoamento das ferramentas de metal-duro.

Figura 2.13 – Ferramenta de metal duro com revestimento com cristais a) em posição aleatória e b) alinhados.



FONTE: Sandvik Coromant [58].

Em coberturas convencionais de alumina pelo processo CVD, o crescimento dos cristais ocorre de forma aleatória. Com este novo procedimento é possível alinhar na mesma direção todos os cristais. Esta alteração garante maior resistência à craterização e ao desgaste de flanco. Além disto, o calor produzido durante a usinagem é conduzido mais rapidamente para longe da zona de corte, de forma que o gume se mantenha intacto por um período maior [59].

Considerado um dos materiais de maior dureza para a fabricação de ferramentas de corte, o PCBN é um compósito cerâmico formado por grãos de Nitreto de Boro Cúbico (CBN) em uma matriz ligante, podendo receber a classificação de alto ou baixo teor de CBN. Classes com alto teor contém 80-95% de CBN, com um ligante metálico (Co, W e Al). Já as classes com baixo teor podem conter de 40-70% de CBN, sendo a matriz composta por um ligante à base de cerâmica como TiC e TiN [24, 9].

A utilização do ligante de cerâmica é de extrema importância, pois aumenta a resistência a difusão e, atualmente, com a possibilidade de redução do tamanho dos ligantes cerâmicos para dimensões submicrométricas, pode-se proporcionar às ferramentas um sensível aumento de dureza. A tabela 2.3 apresenta as propriedades das ferramentas com baixo e alto teor de CBN.

Tabela 2.3 - Características das ferramentas de PCBN.

Propriedades	PCBN baixo teor (50%)	PCBN alto teor (90%)
Tenacidade à fratura [MPa.m ^{-1/2}]	3,7	6,4
Condutividade térmica [W/m ⁻¹ .K ⁻¹]	44	100
Resistência à compressão [GPa]	3,5	2,73
Dureza [Knoop – Gpa]	27,5	31,5

FONTE: Adaptada de Grzesik [12] e Trent e Wright[57].

Devido a essas características, estas ferramentas geralmente são empregadas em condições de difícil usinagem, como no torneamento de materiais endurecidos. Nas ferramentas com baixo teor de CBN, o ligante cerâmico proporciona maior estabilidade química, contudo reduz a dureza e a tenacidade, possuindo, assim, maior tendência a microlascamentos. Em função destas propriedades, tais ferramentas são tipicamente aplicadas a cortes contínuos, em que os mecanismos de desgaste devem-se ao efeito térmico na interface cavaco-ferramenta, enquanto que as ferramentas de alto teor de CBN são aplicadas na usinagem em cortes interrompidos/intermitentes [20, 60, 61].

Pelo fato de nem o Boro, nem o Nitrogênio apresentarem afinidade química com o Ferro e associarem elevada dureza e resistência mecânica, as ferramentas de PCBN e metal-duro impulsionearam o processo de torneamento de materiais endurecidos. A evolução das ferramentas de metal-duro também tornou estas aptas ao processo.

Apesar do desenvolvimento de novos materiais e tecnologias de revestimento, as características geométricas das ferramentas podem influenciar o desempenho das ferramentas e, consequentemente, a qualidade da superfície obtida, situação que será discutida no item a seguir.

2.3.2 Geometria da ferramenta

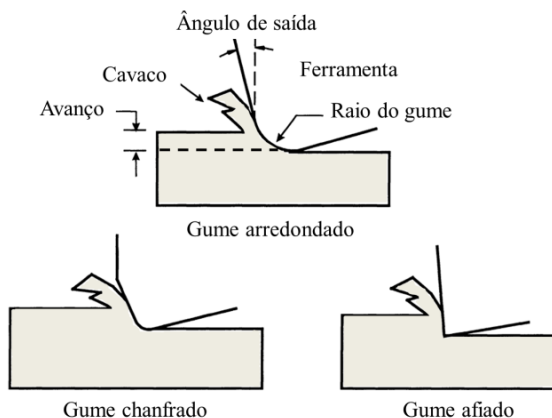
A geometria da ferramenta de corte é uma variável de elevada importância para o processo de usinagem, uma vez que pequenas variações dimensionais e angulares podem gerar respostas distintas quanto ao comportamento do material da peça sobre o gume da ferramenta. Assim, fenômenos como o desgaste da ferramenta, a formação de cavacos e o acabamento da superfície da peça são fenômenos

que estão diretamente relacionados às escolhas de geometria que são realizadas em relação a ferramenta de corte.

Segundo König *apud* Boehs [62], a rugosidade da superfície de uma peça usinada, em condições ideais de trabalho, depende do avanço e da geometria de corte (rugosidade cinemática). Entretanto, em condições reais, a deflexão da ferramenta e as vibrações influenciam o acabamento obtido (rugosidade de processo). Complementando a análise, Schroeter, Weingaertner e Macedo [63] afirmam que os esforços de usinagem e a espessura do cavaco também são influenciados pela deflexão e vibrações da ferramenta. Desta forma, caso a geometria da ferramenta não seja adequada para uma dada aplicação, efeitos indesejáveis ao produto acabado poderão ocorrer no final do processo de usinagem.

A caracterização da macrogeometria da ferramenta é definida pela norma ISO 3002-1(1982-08), entretanto não existe um padrão no que se refere ao raio do gume. Já a norma DIN 6582/1988 classifica, em termos de perfil, o gume da ferramenta em três tipos: afiado, arredondado e chanfrado, conforme Figura 2.14.

Figura 2.14 – Geometrias típicas do gume da ferramenta segundo a norma DIN 6582, no plano de referência da ferramenta (Pr).



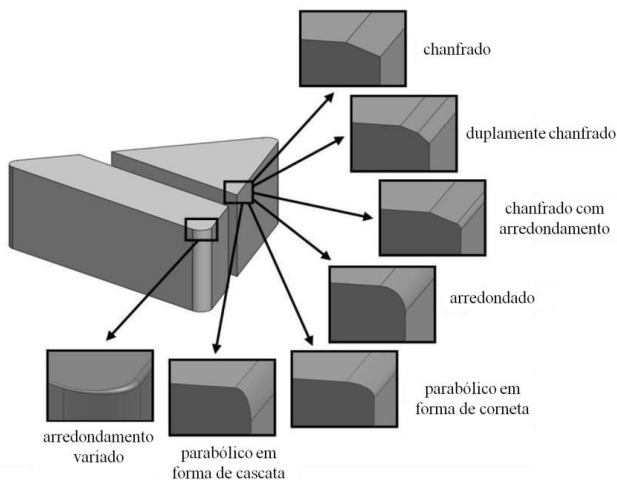
FONTE: Thiele *et al.*[64].

O gume arredondado é formado pelo arredondamento na região de transição entre a face e o flanco. O gume chanfrado é caracterizado pela presença de um ou mais segmentos de reta entre o flanco e a face, sendo que, dependendo da ferramenta de corte, essa pode apresentar um ou mais chanfros. Já o gume afiado não apresenta nem arredondamentos nem

chanfros, não podendo ser realizado nenhum tipo de diferenciação, não sendo uma geometria usual.

Além dos gumes apresentados, existem outros tipos de diferentes combinações de forma, mas que não são padronizadas. Karpat e Özel [65] desenvolveram um modelo mais detalhado para a representação de alguns tipos de perfil de gume, conforme a Figura 2.15.

Figura 2.15 - Perfis de gumes de ferramentas de corte.

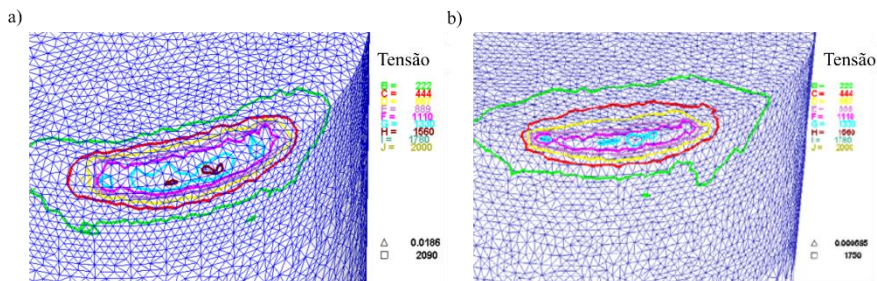


FONTE: Adaptada de Karpat e Özel [65] e Souza [66].

A existência de diferentes tipos de geometria é de extrema importância para que cada processo de usinagem tenha a ferramenta mais compatível e adequada. Além disso, a caracterização do gume é um elemento essencial, pois influencia o mecanismo de corte e a formação de cavaco.

Karpat e Özel [65] compararam as duas microgeometrias de ferramentas de baixo teor de CBN (50%), uma com gume chanfrado e a outra com gume arredondado, na usinagem do aço AISI H13 (55 HRC). Segundo os autores, o gume arredondado obteve melhor desempenho, gerando baixos valores para as componentes da força de usinagem e menor desgaste de flanco. No que tange à ferramenta com gume chanfrado, estas geraram maior concentração de tensões na interseção do chanfro e da face, causando maiores desgastes, conforme Figura 2.16.

Figura 2.16 - Distribuição de tensões nas ferramentas com a) gume chanfrado e b) com gume arredondado.



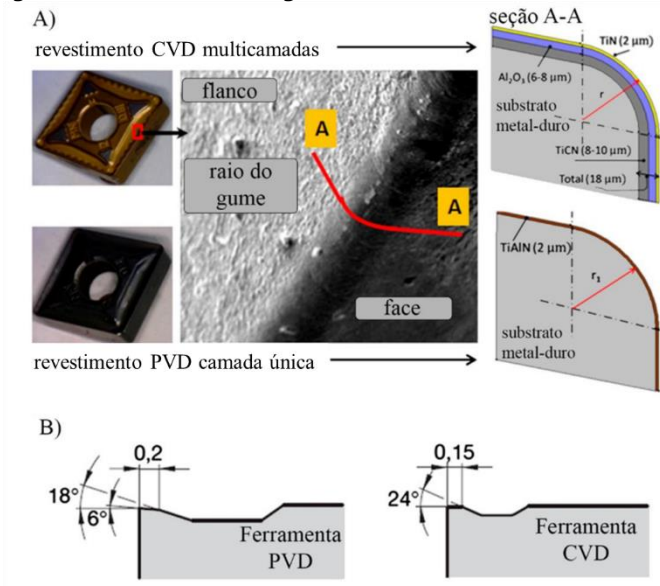
FONTE: Karpát e Özel [65].

Os autores ainda afirmam que a finalidade da utilização de ferramentas com gume arredondado é protegê-lo de possíveis lascamentos, melhorar a resistência a impactos e aumentar a área de superfície para a transferência de calor da zona de corte. Complementando a discussão, Diniz e Oliveira [11] afirmam que com a microgeometria arredondada, a área de contato da ferramenta com a peça é maior e a formação de cavacos é dificultada, principalmente no gume secundário, onde a espessura de usinagem é muito fina. Além disso, para a pequena espessura de usinagem, quando utilizado o gume arredondado, o ângulo de saída efetivo é mais negativo que o verificado com o gume chanfrado.

Outro fator que afeta também o desempenho da ferramenta de PCBN é a geometria extremamente negativa. Devido a fragilidade deste tipo de ferramenta, esta necessita deste aspecto para garantir a integridade do gume e maior estabilidade à ferramenta. Entretanto, segundo König e Klocke [16], ângulos de saída negativos tendem a acarretar maior deformação plástica, aumentando as forças de corte do processo.

A grande diferença entre a geometria da ferramenta de PCBN das ferramentas de metal-duro é que essas últimas normalmente apresentam perfil do gume formado por uma curvatura ideal, conforme Figura 2.17-a.

Figura 2.17 – Micro e macrogeometria da ferramenta de metal-duro.



FONTE: Chinchanihar e Choudhury [67].

Quanto a macrogeometria, este tipo de ferramenta apresenta ângulos de saída positivos, como pode ser visto na Figura 2.17-b, em que existe um distanciamento de aproximadamente 0,2 mm até a região do quebra cavaco. Esta característica promove a redução da força de corte e avanço, proporcionando melhor acabamento da superfície da peça. Entretanto, devido ao enfraquecimento da cunha e o constante aumento do desgaste no flanco, estas ferramentas tendem a sofrer danos mais rapidamente. Além disso, devido ao fácil escoamento do cavaco, muitas vezes sua quebra é insuficiente, gerando cavacos do tipo contínuo.

2.4 INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE

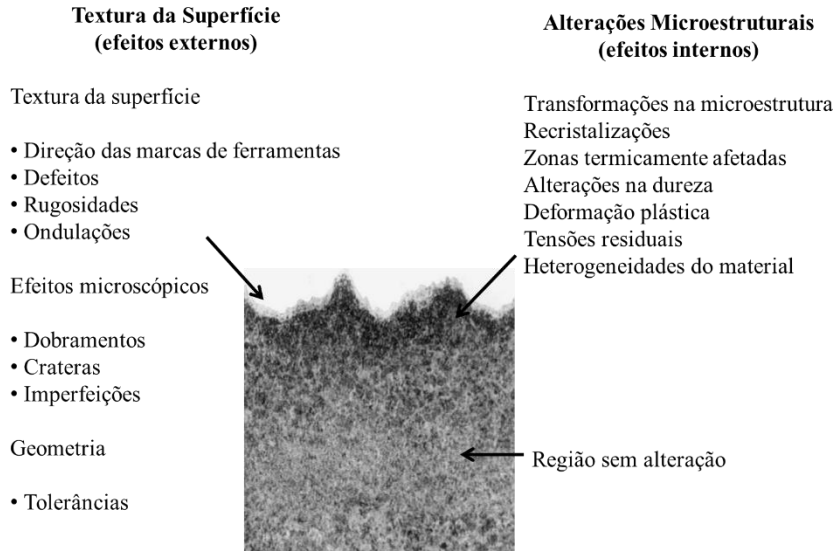
A preocupação com as características de uma superfície usinada começou a ganhar maior relevância principalmente com o aumento da exigência quanto ao nível de qualidade, vida, confiabilidade e desempenho, bem como o desenvolvimento de componentes com aplicações críticas de engenharia, como nos campos aeronáutico, biomédico e automobilístico.

Além do controle dimensional, tradicionalmente, a textura da superfície (rugosidade, ondulações e marcas de ferramenta) tem sido aceita como critério suficiente para se realizar o controle de qualidade das peças fabricadas por processos de remoção de material. Entretanto, após diversos estudos, verificou-se que a medição da textura é apenas uma parte da análise, já que as alterações nas propriedades que ocorrem abaixo da superfície também exercem influência relevante sobre o desempenho dos componentes. Ou seja, enquanto que a textura da superfície leva em consideração aspectos geométricos, as alterações microestruturais abordam as características mecânicas, químicas e metalúrgicas da superfície obtida [1].

Para poder definir os mecanismos que atuam direta ou indiretamente na superfície e que exercem influência no seu desempenho, criou-se o termo integridade da superfície. Assim, a integridade da superfície diz respeito não somente aos aspectos topográficos da superfície, mas sim a todo o conjunto de suas condições físicas, químicas, metalúrgicas, mecânicas e biológicas. Seu objetivo é garantir que as superfícies que foram submetidas a processos de fabricação mantenham as propriedades desejadas [68].

Dentro do conjunto de alterações que podem ser geradas na peça durante o processo de usinagem, encontram-se: deformações plásticas, rupturas, recuperação elástica, transformação de fase, tensões residuais, entre outras, conforme apresenta a Figura 2.18. Estas mudanças ocorrem numa camada abaixo da superfície e geralmente acompanham os padrões de textura da topografia da superfície [1].

Figura 2.18 - Efeitos na textura da superfície e nas alterações microestruturais.



FONTE: Adaptada de ASM Handbook [69].

Como pode ser visto, a mudança da estrutura da superfície de um componente submetido ao processo de remoção de material é inevitável, devido aos múltiplos fenômenos presentes no processo de usinagem. No caso específico do torneamento de materiais endurecidos, como foi visto, as componentes da força de usinagem, o mecanismo de formação de cavaco, os materiais e as ferramentas de corte são elementos que interagem e provocam alterações na superfície usinada.

2.4.1 Rugosidade

Pode-se definir rugosidade da superfície como sendo os desvios repetitivos ou aleatórios da superfície nominal, a qual advém da geometria base da ferramenta e da cinemática da operação, que formam a topografia tridimensional de uma superfície, apresentando também influência de fatores adversos do processo, como desgaste, vibrações etc [68, 1].

Os parâmetros de rugosidade 2D estão previstos na norma ISO 4287/1997 e são divididos em três critérios principais: amplitude, espaçamento e híbridos. Os primeiros avaliam o comportamento do perfil

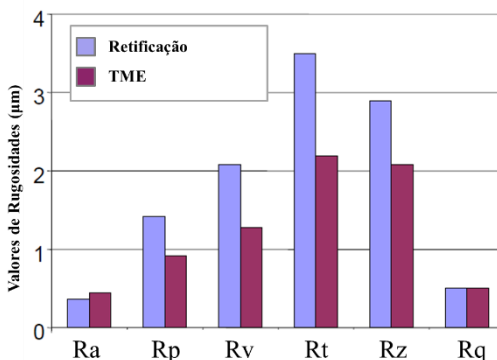
da superfície, ou seja, com que frequência vales e picos aparecem, bem como o distanciamento entre eles. Nesta categoria estão incluídos parâmetros como Ra, Rt, Rz e Rq, bem como os parâmetros que avaliam o comportamento tribológico da superfície e que encontram-se diretamente correlacionados com a curva de Abbott, como os parâmetros Rsk, Rku, Rpk e Rvk.

Os parâmetros de espaçamento avaliam as características presentes ao longo do comprimento longitudinal do perfil da superfície, sendo o parâmetro RSm o mais conhecido. Por fim, os parâmetros híbridos resultam da combinação da análise longitudinal do perfil da superfície quanto da distribuição e distanciamento de picos e vales, sendo o RΔq o único previsto na norma ISO.

Kundrak e Bana [70] compararam os processos de torneamento de materiais endurecidos (TME) com ferramenta de PCBN e retificação de um aço 16MnCr5 cementado, temperado e revenido, com a dureza variando entre 61 – 63 HRC.

A partir da Figura 2.19, verifica-se que os valores da rugosidade média (Ra) e o perfil da rugosidade do desvio quadrado médio (Rq) apresentaram valores similares em ambos os processos de acabamento, não excedendo 0,5 μm . Já os valores obtidos com os demais parâmetros foram melhores para o processo de torneamento. Assim, a comparação entre diferentes parâmetros de rugosidade da superfície mostra as diferenças entre os dois processos em análise.

Figura 2.19 - Comparação dos valores dos parâmetros de rugosidade obtidos pelo processo de retificação e de torneamento de materiais endurecidos.

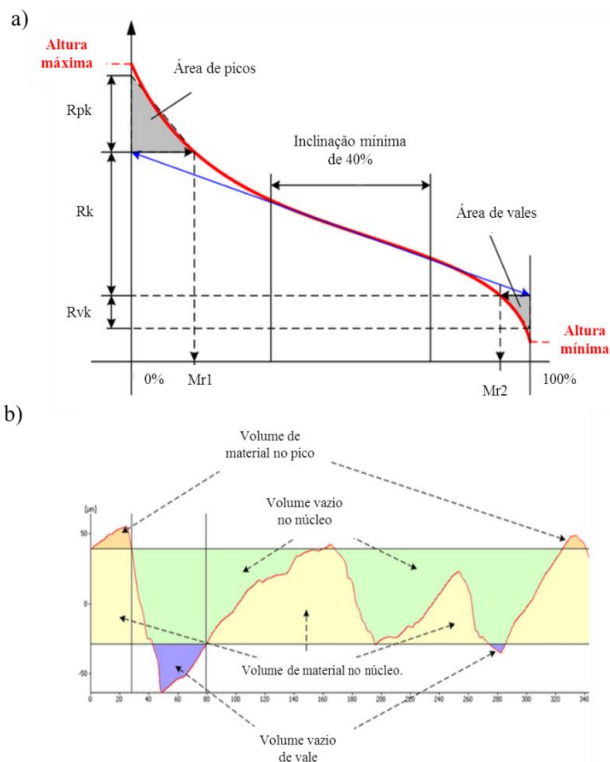


FONTE: Kundrak, e Bana [70].

Apesar dos valores obtidos serem muito próximos, ambas as superfícies não podem ser consideradas iguais, com mesmas propriedades. Além disso, tais parâmetros não permitem obter resultados relativos às características funcionais das superfícies geradas, sendo necessária a análise da curva de Abbott para maior compreensão desses elementos.

A curva de Abbott-Firestone, conforme a Figura 2.20-a é definida especificamente segundo três parâmetros R_{pk} , R_k e R_{vk} e duas fronteiras chamadas de $Mr1$ e $Mr2$ (DIN 4776 e ISO 13565-2). Estes parâmetros caracterizam a curva de distribuição da área total de contato com a aplicação do duplo filtro gaussiano, ferramenta que possibilita a obtenção dos parâmetros de rugosidade, eliminando a presença de vales muito profundos ou picos muito elevados (Figura 2.20-b).

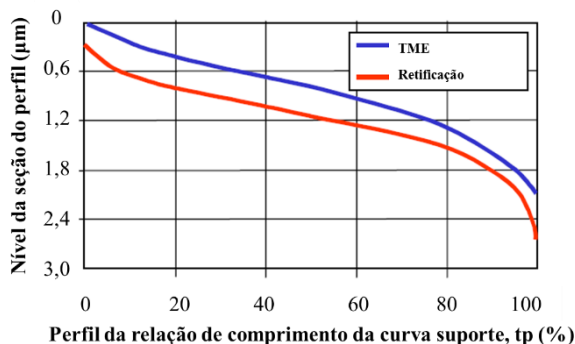
Figura 2.20 - Curva de Abbott- Firestone a) parâmetros gerados e b) curva de rugosidade com duplo filtro gaussiano.



FONTE: Alicona [71].

Kundrak e Bana [70], obtiveram as curvas de Abbott para o processo de torneamento e de retificação, conforme Figura 2.21.

Figura 2.21 - Comparação das curvas de Abbott dos processos de retificação e de torneamento de materiais endurecidos.

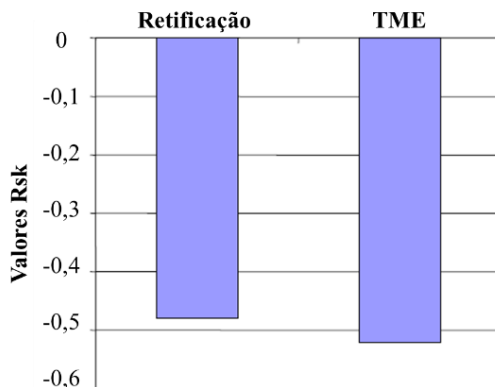


FONTE: Kundrak e Bana [70].

Apesar das curvas não serem exatamente iguais, as suas características são similares. Ambas as superfícies geradas apresentaram reduzida presença de picos muito elevados, garantindo o menor desgaste da superfície no momento da aplicação da carga inicial; desejada área de suporte e a maior presença de vales, garantindo boa capacidade de retenção de lubrificante.

O perfil *skewness* (R_{sk}) de ambos os processos é bem próximo e apresentam valores negativos, ou seja, a topografia apresenta mais vales que picos. Este parâmetro tem por finalidade caracterizar a simetria do perfil da superfície analisada. Se os picos e vales estão distribuídos tal qual uma curva normal, exatamente simétrica, o *skewness* é zero. Qualquer perfil assimétrico gera valores $R_{sk} \neq 0$. Se a superfície apresenta mais vales que picos, o R_{sk} será negativo e para superfície com maior presença de picos, será positivo.

Figura 2.22 - Comparação do perfil *skewness* (Rsk) nos processos de retificação e torneamento de materiais endurecidos.



FONTE: Kundrak e Bana [70].

Considerando os resultados obtidos nas Figuras 2.21 e 2.22, e valor negativo para o parâmetro Rsk, as topografias obtidas por ambos os processos apresentam boa propriedade de retenção de lubrificantes, garantindo maior resistência ao desgaste e um bom comportamento funcional das superfícies. Devido a essas características apresentadas, os autores afirmam que o processo de torneamento de materiais endurecidos é adequado para o acabamento de componentes e capaz de gerar superfícies com características próximas às obtidas por retificação ou até mesmo melhores.

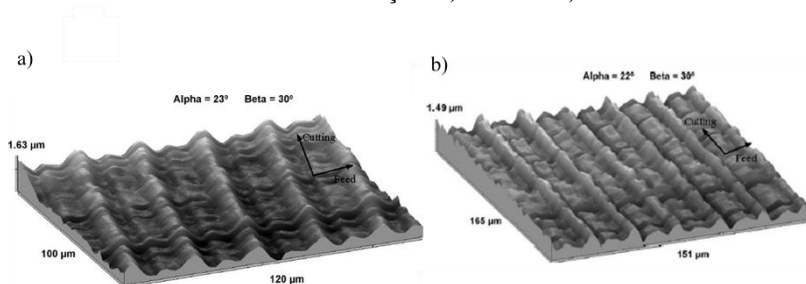
Waikar e Guo [72] também analisaram os processos de retificação e torneamento do aço AISI 52100 (61 ± 1 HRC) e para isso utilizaram duas condições extremas – suave e severa - de modo a verificar o comportamento dos dois processos quando submetidos a distintas variáveis.

Para o processo de torneamento, nas duas condições foi utilizada ferramenta de CBN, com iguais características geométricas e a usinagem ocorreu sem o uso de fluido de corte. Entretanto, no que tange à condição suave, a ferramenta empregada era nova e a velocidade de corte baixa (106,8 m/min). Já para a condição severa, a usinagem ocorreu em elevadas velocidades de corte (169,2 m/min) e a ferramenta apresentava desgaste de flanco (VB) de 0,5 mm, de modo a provocar a transformação de fase na superfície usinada.

No processo de retificação, utilizou-se rebolo de Al_2O_3 para os dois casos, sendo que para a condição suave houve a presença de fluido

lubrificante e baixas velocidades de corte, enquanto que para a usinagem severa, o processo ocorreu a seco e em elevadas velocidades de corte. As topografias obtidas para os dois processos podem ser verificadas nas Figura 2.23 e 2.24.

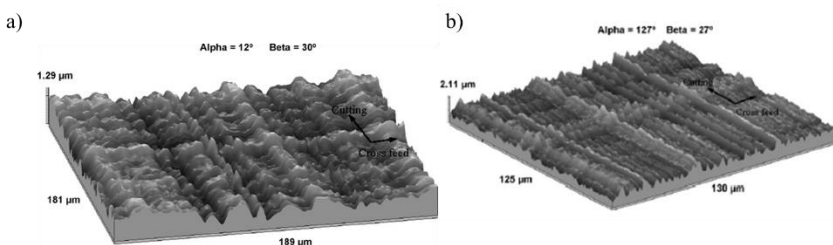
Figura 2.23 - Topografia da superfície do aço AISI 52100 após processo de torneamento em condições a) suaves e b) severas.



FONTE: Waikar e Guo [72].

A partir da Figura 2.23, verifica-se que a topografia obtida pelo processo de torneamento apresenta natureza periódica e anisotrópica, enquanto a obtida por retificação, Figura 2.24, é aleatória e isotrópica. Esta variação, segundo os autores, deve-se à geometria do gume da ferramenta.

Figura 2.24 - Topografia da superfície do aço AISI 52100 após processo de retificação em condições a) suaves e b) abusivas.



FONTE: Waikar e Guo [72].

O processo de torneamento utiliza somente um gume com geometria definida, que associado ao parâmetro de avanço, tende a gerar uma superfície simétrica. Em contraste, o processo de retificação utiliza

rebolos com abrasivos de geometria irregular e distribuídos aleatoriamente. Assim, o tamanho e forma dos abrasivos e seus espaçamentos são decisivos para a topografia da superfície resultante.

Pode-se perceber a partir das figuras anteriores, que a análise 3D é de grande importância para a real compreensão da superfície existente, pois somente os parâmetros 2D não conseguem representar os diferentes fenômenos que ocorrem ao longo da topografia. Diante desses problemas, Waikar e Guo [72] realizaram um levantamento das principais limitações da análise do perfil 2D de uma superfície:

- (a) A necessidade do desenvolvimento de parâmetros 3D surgiu da incapacidade do perfil 2D representar as reais condições da superfície, como picos, vales e estruturas anisotrópicas, limitando-se à análise de um plano em particular.
- (b) Os parâmetros 2D definidos em alguns padrões nacionais e internacionais podem variar de país para país. Outro problema apresentado é que o domínio dos fabricantes de instrumentos de medição no desenvolvimento de parâmetros 2D resultou em alguns problemas de definição. Por exemplo, a rugosidade R_a de uso geral não tem significado funcional direto e é menos significativa do que a análise estatística RMS. Além disso, alguns parâmetros estão correlacionados. Um exemplo bem conhecido é a correlação da rugosidade média aritmética R_a e R_q .
- (c) A topografia 3D tem uma melhor correlação com o desempenho funcional de componentes. Os efeitos dos parâmetros de superfície 2D tem sido estudados para avaliar desgaste, deformação e fadiga, por exemplo. Em geral, os parâmetros 3D têm sido definidos para compreender a propriedade de retenção de fluido na superfície, que poderia explicar o potencial desgaste e fricção da mesma.

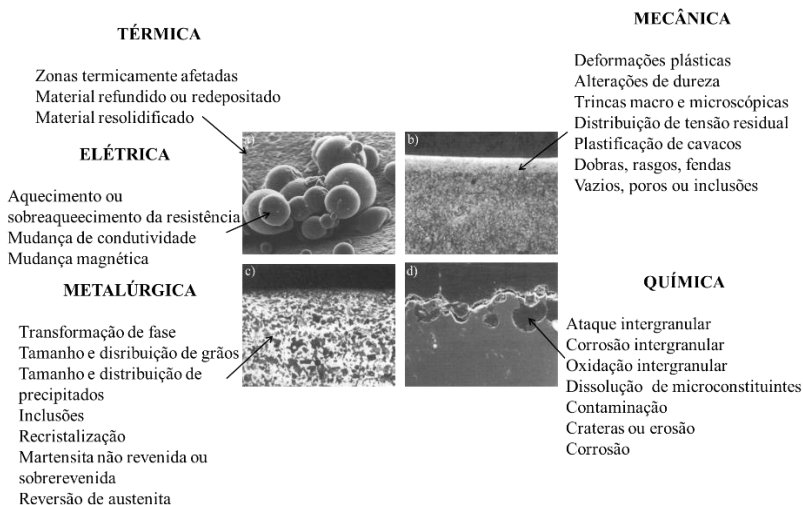
Devido as limitações existentes no método 2D, a análise 3D tem ganhado maior relevância pois permite a melhor compreensão dos múltiplos fenômenos presentes nas superfícies usinadas, bem como torna possível um estudo mais aprofundado no que tange as características funcionais dessas superfícies, podendo-se, assim, realizar uma avaliação mais específica do desempenho das mesmas.

2.4.2 Alterações microestruturais

O desempenho de um componente fabricado é influenciado pela qualidade e confiabilidade da superfície produzida tanto em termos topográficos, bem como metalúrgico e mecânico do estado da camada da subsuperfície. Muitos estudos têm sido realizados nas últimas décadas para investigar as relações entre os parâmetros do processo de usinagem, a natureza das alterações da superfície produzida e o seu efeito sobre o desempenho do componente. A força motriz por trás disso tem sido a constante necessidade de atender à crescente demanda no desempenho do componente, confiabilidade e durabilidade, estimulando assim, o desenvolvimento de materiais com maior resistência a elevadas cargas e ambientes adversos, juntamente com métodos de fabricação com elevado desempenho [73].

Dependendo do tipo e da intensidade da energia empregada no processo de usinagem, as propriedades do material da peça de trabalho ficam afetadas, gerando assim uma ampla variedade de alterações na subsuperfície, as quais foram levantadas por Bellows e Tishler [74] e divididas em cinco critérios principais – a saber – mecânicas, metalúrgicas, químicas, térmicas e elétricas, conforme Figura 2.25.

Figura 2.25 – Tipos de alterações microestruturais típicos nos processos de usinagem a) eletroerosão, b) torneamento, c) furação e d) eletroquímico.



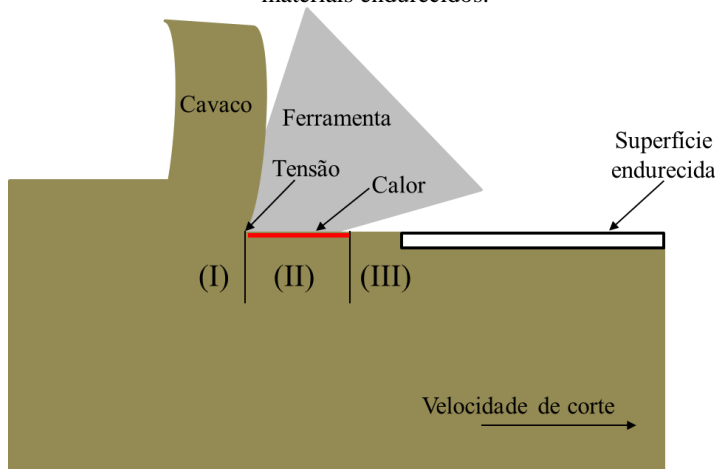
FONTE: Adaptada de Bellows e Tishler [74].

No caso específico do torneamento de materiais endurecidos, o efeito termomecânico pode provocar mudanças na microestrutura do material, na dureza e nas tensões residuais. Em processos de usinagem, a introdução de energia mecânica praticamente é toda convertida em calor. Dependendo da quantidade de energia requerida para as alterações microestruturais, trincas bem como a redução da dureza ou até mesmo regiões de elevada dureza formada por martensita não revenida seguida de uma camada sobrevenida podem ocorrer. Outro fenômeno também muito comum é a formação de camadas brancas, denominadas assim, por apresentarem essas características quando observadas ao microscópio óptico.

A ocorrência de camadas brancas na usinagem de aços endurecidos prova que processos metalúrgicos podem ser induzidos pelos seus respectivos mecanismos de formação de cavaco. No caso do torneamento de materiais endurecidos, a maior quantidade de calor é gerada na área de formação do cavaco, sendo que grande parte do calor é dissipado por meio deles; enquanto que na retificação o calor é gerado abaixo do rebolo e somente uma parte dele é dissipado pelos cavacos e a outra penetra as camadas da subsuperfície do componente.

Os mecanismos de formação da camada branca foram descritos por Chou e Evans [75], os quais a relacionaram com três distintas regiões, apresentadas na Figura 2.26.

Figura 2.26 – Mecanismos de formação de camada branca no torneamento de materiais endurecidos.



FONTE: Bosheh e Mantivega [76].

A região (I) representa o volume de material imediatamente antes do corte (que se encontra acima da ferramenta de corte e abaixo da superfície a ser gerada pela usinagem). Nesta área, o material é submetido a compressão plástica e elevada propagação de calor nas zonas de cisalhamento. Quando o material adentra a região (II), onde a pressão de contato entre o flanco da ferramenta e a peça é significativo, o calor é gerado por atrito e conduzido para a peça (que está numa temperatura baixa) e uma parcela menor para a ferramenta (que está numa temperatura elevada no processo em regime). Nesta região o material está sujeito a elevadas tensões. A reação química com a ferramenta é possível se o par peça-ferramenta possuir elevada afinidade química.

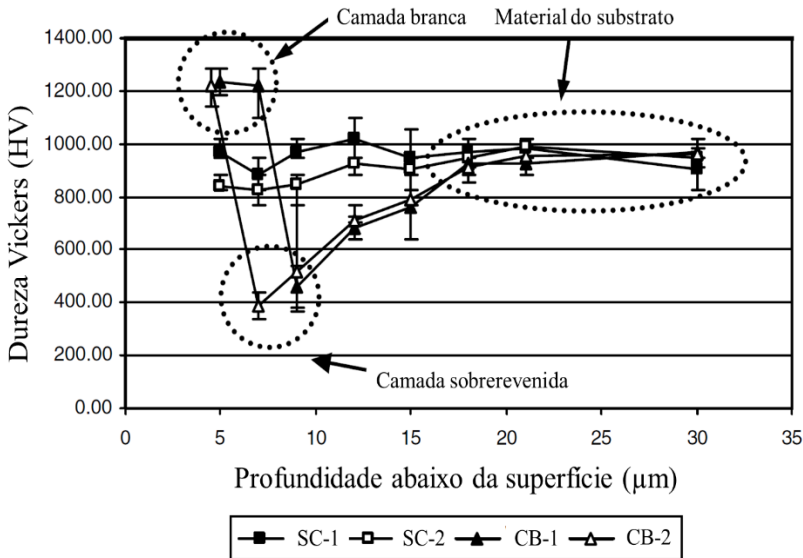
Quando o material deixa a área de contato e se desloca para a região (III), a condução de calor para o volume frio da peça continua e ocorre a redução das tensões, já que não há mais a atuação de forças na superfície. O resfriamento do material pelo contato com o ambiente e pela influência da rotação da peça no processo de torneamento não é significativo em relação ao autorresfriamento, devido a baixa capacidade térmica do ar (ou de vapor de fluido de corte no caso do emprego deste). A parcela do volume de material na região II acima da temperatura de austenitização, pelo autorresfriamento na região III, possibilita a ocorrência da retêmpera, formando assim a camada branca. É possível ainda que haja uma reação química da região superaquecida com o ambiente.

Complementando a análise, Griffiths [77] atribui a formação de camada branca a um ou mais possíveis mecanismos: (i) rápido aquecimento por deformações plásticas localizadas (atrito) e têmpera por autorresfriamento, os quais resultam em transformação de fase, (ii) a severa deformação plástica produz uma estrutura homogênea com muitos grãos finos, e (iii) reação da superfície com o ambiente.

A maioria dos estudos tem mostrado que, independentemente do processo de usinagem utilizado, as camadas brancas apresentam maior dureza que o material não alterado [78]. A fim de avaliar esse parâmetro, Schwach e Guo [79] obtiveram os perfis de dureza em ensaios com condições de presença e ausência de camada branca. A Figura 2.27 mostra os resultados obtidos pela avaliação do aço AISI 52100, em que a análise da dureza com a camada branca é representada por CB e sua ausência por SC; já os índices 1 e 2 são relativos às alterações nos parâmetros de usinagem. Assim, para a superfície sem camada branca (SC), o parâmetro alterado foi o avanço, sendo que o índice 1 é relativo ao valor do maior avanço e o índice 2, ao de menor avanço. Para a superfície com camada

branca, o parâmetro alterado foi o desgaste de flanco, em que o índice 1 representa VB= 0,7 mm e o índice 2, VB= 0,4 mm.

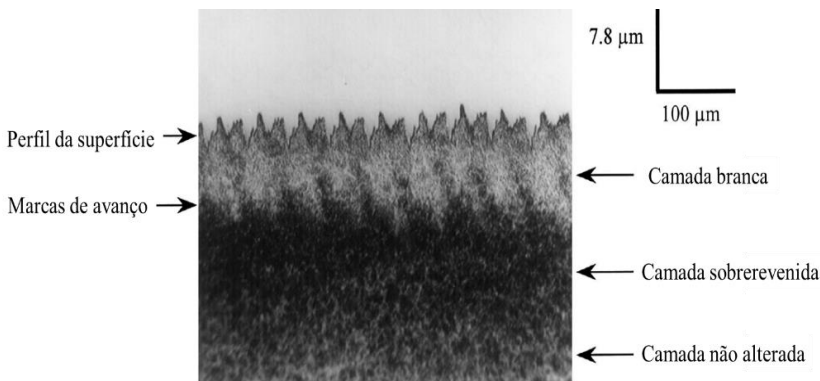
Figura 2.27 – Perfil de microdureza na subsuperfície.



FONTE: Schwach e Guo [79].

Na profundidade de aproximadamente 7 μm para a condição de usinagem que levou a formação de uma camada branca (CB-1 e CB-2), a microdureza é aproximadamente 800 HV mais elevada que o material base (SC-1 e SC-2). Além disto, é possível observar a formação de três regiões distintas: a primeira formada pela camada branca, com dureza de 1200 HV; a 900 HV, encontra-se o material do substrato e uma camada sobrevenida bem mais macia e com dureza de 400 HV. Com a finalidade de verificar essas diferentes regiões, Chou e Evans [75], analisaram a formação de camada branca no aço AISI 52100, Figura 2.28.

Figura 2.28 – Alteração microestrutural no torneamento do aço AISI 52100.

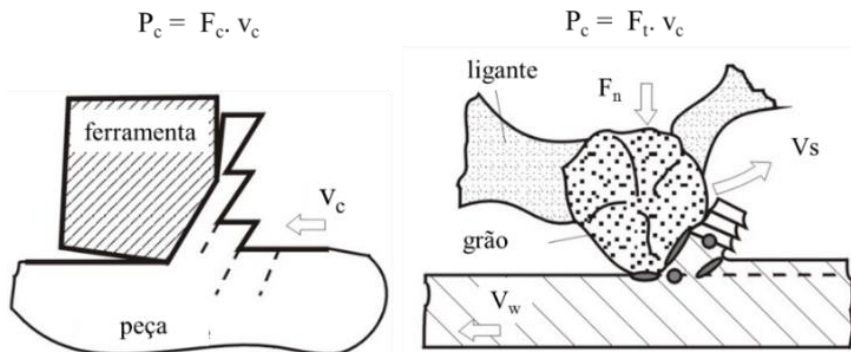


FONTE: Chou e Evans [75].

Assim, a camada branca formada após torneamento de materiais endurecidos gera a divisão da subsuperfície do material em três distintas regiões: uma camada branca (martensita não revenida), a qual é frágil e suscetível a trinca; uma camada de martensita sobre revenida, de menor dureza e, portanto, menor resistência ao escoamento; e o substrato, que representa a região que não foi alterada [80].

A formação de camada branca e demais alterações está diretamente relacionada à escolha da operação de usinagem e dos parâmetros de processo. Assim, com o intuito de comparar o impacto termomecânico dos processos de torneamento e retificação na superfície do componente, Brinksmeier e Brockhoff [81] e Tönshoff, Karpuschewski e Borbe [82] realizaram uma estimativa da dissipação de energia, por meio da análise das forças do processo, do desgaste da ferramenta e das velocidades de corte, conforme Figura 2.29 e Tabela 2.4.

Figura 2.29 - Conversão de energia no torneamento e na retificação, respectivamente.



FONTE: Brinksmeier e Brockhoff [81].

Tabela 2.4 - Estimativa da energia dissipada nos processos de retificação e torneamento em materiais endurecidos.

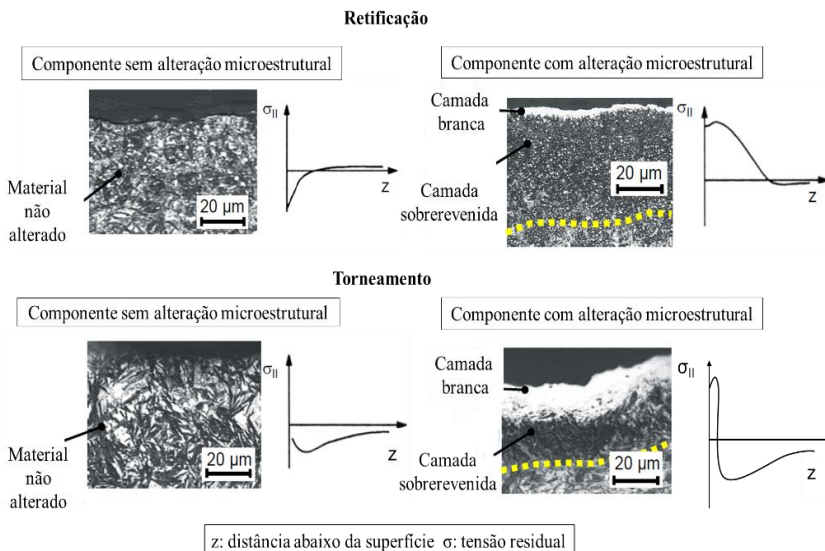
Parâmetros	Retificação	TME
Parâmetros de usinagem	$v_c = 35 \text{ m/s}$, $a_p = 2,5 \text{ mm}$, $I_c = 0,6 \text{ mm}$	$v_c = 150 \text{ m/min}$, $I_c = 0,8$ $\text{mm VB} = 0,2 \text{ mm}$
Força de usinagem (F_t)	70 N	300 N
Potência de corte (P_c)	2450 W	750 W
Potência de corte específica (P_c'')	1633 W/mm ²	4688 W/mm ²
Quantidade de calor específica (q_w'')	572 W/mm ²	703 W/mm ²
Tempo de contato (t_c)	28,8 ms	0,08 ms
Energia específica (e_c'')	16,5 J/mm ²	0,056 J/mm ²

FONTE: Tönshoff, Karpuschewski e Borbe [82].

A partir dos dados da Tabela 2.4, observa-se que os valores mais elevados para a potência específica de corte P_c'' ocorrem no torneamento de materiais endurecidos. Devido as condições geométricas e cinemáticas, o tempo de contato t_c entre ferramenta e a superfície da peça é significativamente menor neste processo do que na retificação, resultando em baixos valores para energia específica de corte e_c'' . Isto explica as menores extensões de camadas brancas ocorridas no processo de torneamento [39, 37]. Assim, os autores afirmam que a geração de camada branca pode ser evitada ao se adaptar os parâmetros do processo de usinagem.

Outra característica que influencia o comportamento dos componentes são as tensões residuais geradas nos processos de usinagem, como pode ser observado na Figura 2.30.

Figura 2.30 - Comportamento das tensões residuais após retificação e torneamento de materiais endurecidos.

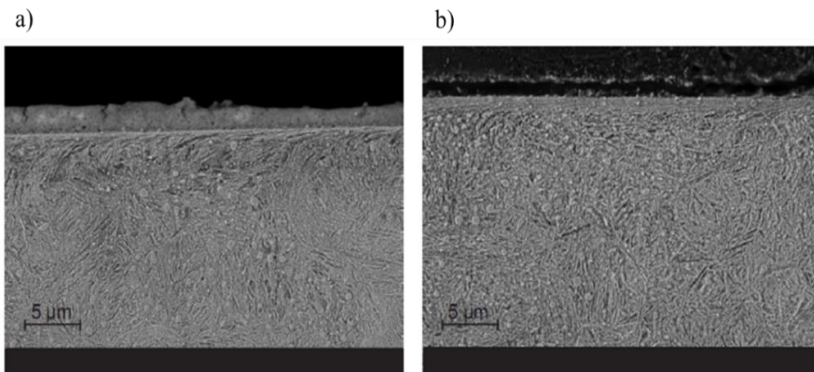


FONTE: Klocke, Brinksmeier e Weinert [4].

No torneamento de materiais endurecidos, a tensão máxima de tração ocorre diretamente na superfície, enquanto que na retificação, localiza-se abaixo da superfície, em regiões mais profundas da subsuperfície. Essas mudanças estruturais normalmente devem-se às zonas sobrevenidas próximas à superfície, sendo que o aumento das cargas térmicas pode provocar o surgimento de camadas brancas.

A geometria da ferramenta de corte é outro parâmetro que afeta diretamente a integridade da superfície. Assim, Guddat *et al.* [83] analisaram a integridade da superfície no torneamento de uma peça de aço AISI 52100 (60 HRC) usando ferramentas de PCBN com geometria convencional e geometria *wiper* (alisadora). A geometria alisadora possui uma alteração no que tange o raio de ponta, de modo que o avanço e a profundidade de corte possam ser o dobro do usado em ferramentas convencionais. As alterações geradas podem ser vistas na Figura 2.31.

Figura 2.31 - Alterações na superfície do aço AISI 52100 após processo de torneamento com inserto a) convencional e b) *wiper*.

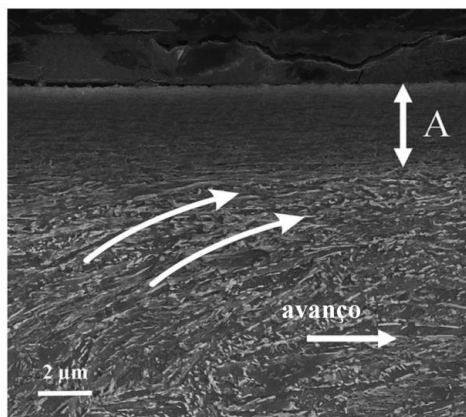


FONTE: Guddat *et al.* [83].

Ambas as ferramentas empregadas foram submetidas a condições extremas de usinagem, ou seja, com a presença de severos desgastes. Os autores observaram que com o aumento do desgaste da ferramenta, a microestrutura é afetada em maior profundidade e alterações microestruturais são mais visíveis. O inserto convencional provoca principalmente a formação de linhas de fluxo no material, as quais aumentam proporcionalmente em relação aos desgastes gerados; enquanto que o inserto com geometria alisadora, as alterações geradas são mais sensíveis e atingem regiões menos profundas da superfície.

Este fenômeno também foi observado por Javidi, Rieger e Eichlseder [14], na análise de um aço AISI 4340 tratado termicamente a uma dureza de 350 HV e usinado pelo processo de torneamento, obtendo-se a superfície presente na Figura 2.32.

Figura 2.32 - MEV da camada da subsuperfície do aço AISI 4340 após processo de torneamento.



FONTE: Javidi, Rieger e Eichlseder [14].

A partir da superfície gerada, é possível observar a formação de duas regiões distintas: a zona A, em que os grãos encontram-se severamente distorcidos e logo abaixo uma região, onde é possível identificar a alteração por deformação plástica, bem como a mudança da orientação da microestrutura conforme a direção de avanço da ferramenta de corte.

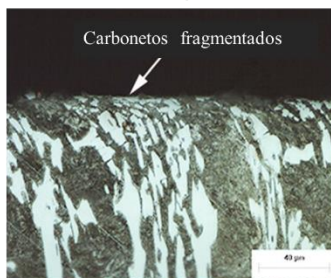
Outro tipo de alteração microestrutural foi relatada por Oliveira, Boing e Schroeter [84], após realizar o torneamento do ferro fundido branco com elevado teor de cromo, tanto com corte contínuo quanto interrompido, com ferramenta de CBN. A Figura 2.33 mostra as mudanças promovidas pelo gume da ferramenta no início da usinagem e no final da vida da ferramenta.

Figura 2.33 - Integridade da camada abaixo da superfície usinada do ferro fundido branco com elevado teor de cromo.

a) CBN 7025 – primeiro passe – corte contínuo



b) CBN 7025 – ferramenta desgastada – corte contínuo



c) CBN 7025 – primeiro passe – corte interrompido



d) CBN 7025 – ferramenta desgastada – corte interrompido



FONTE: Oliveira, Boing e Schroeter [84].

A Figura 2.33-a,c mostra as mudanças promovidas pela ferramenta de CBN 7025 no corte contínuo e o interrompido com uma ferramenta nova. Nestas condições, os gumes não mostraram significativas mudanças geométricas, sugerindo que durante o corte os carbonetos foram cisalhados eficientemente.

Por outro lado, na figura 2.33-b,d observa-se que os carbonetos foram fragmentados, formando uma camada de aproximadamente 10 μm abaixo da superfície usinada. Uma explicação para este fenômeno é que, ao final da vida, o gume da ferramenta vai gradualmente perdendo material, aumentando a área de contato entre o flanco da ferramenta e a peça. Isto pode inibir o cisalhamento dos carbonetos, gerando assim, a fragmentação dos mesmos e seu rearranjo na matriz do material.

Diversas são as naturezas dos fenômenos que influenciam a integridade da superfície, sendo que a escolha do processo de usinagem e seus parâmetros são determinantes para a condição final obtida. No caso do torneamento de materiais endurecidos, por ser um processo

termomecânico, deformação plástica, formação de camada branca e linhas de fluxo são as alterações mais observadas. Entretanto, como foi visto, essas condições podem ser alteradas principalmente quando se trabalha com materiais com diferentes condições microestruturais.

3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo foram descritos os materiais, ferramentas e equipamentos que foram necessários para a realização dos ensaios de torneamento.

3.1 PROCESSO DE TORNEAMENTO

O processo de torneamento empregado neste trabalho consiste no torneamento radial ou faceamento, com movimento retilíneo e perpendicular ao eixo de rotação da máquina. Para a realização deste procedimento foram utilizadas ferramentas de PCBN e metal-duro de grãos ultrafinos e os parâmetros empregados foram selecionados de modo que abrangessem os intervalos dos parâmetros de corte típicos do processo de acabamento recomendados pelo fabricante de cada ferramenta.

Os ensaios foram realizados em um torno CNC de modelo Heynumat 10U do fabricante Heyligenstaedt (Figura 3.1), do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP). A máquina-ferramenta possui potência nominal no eixo árvore de 75 kW, rotação máxima de 4500 rpm, placa com fechamento hidráulico de três castanhas com pressão máxima de 45 bar, diâmetro da placa de 300 mm e com comando CNC Siemens 802D.

Figura 3.1 - Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de torneamento.

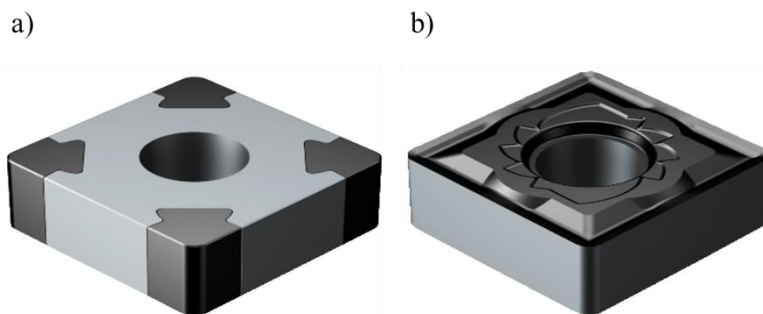


FONTE: Acervo do Grupo GUME.

3.2 FERRAMENTAS DE CORTE, PORTA-FERRAMENTA E SISTEMA DE FIXAÇÃO

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de torneamento são insertos de PCBN (Nitreto de Boro Cúbico Policristalino) e metal-duro. A ferramenta de PCBN empregada é composta 60% por CBN com uma distribuição bimodal de grãos (1 e 3 μm) em um ligante de cerâmica (TiN). Já a ferramenta de metal-duro é revestida com TiAlN, pelo método PVD, cujo substrato é composto por grãos ultrafinos de carboneto de tungstênio, garantindo maior dureza à ferramenta. Por se tratarem de insertos quadrados, cada ferramenta apresenta oito gumes, como consta na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Representação dos insertos de a) PCBN e b) metal-duro de grãos ultrafinos utilizados nos ensaios de torneamento.



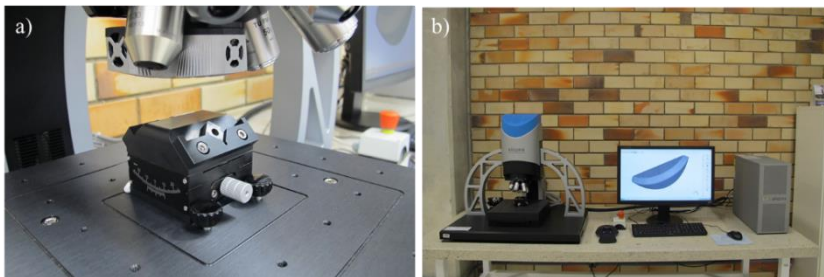
FONTE: Sandvik Coromant [58].

A parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE) possibilitou a caracterização da geometria dos gumes dos insertos no Microscópio Óptico de Foco Infinito Alicona.

Antes da medição, as ferramentas foram limpas por ultrassom em álcool etílico 95% e sua secagem feita por um jato de ar comprimido. O inserto foi então posicionado e fixado no dispositivo porta-ferramenta acoplado ao microscópio, o qual permite o posicionamento relativo entre a ferramenta e a lente do microscópio de 0° a 180°, como pode ser visto na Figura 3.3-a. Posteriormente é realizado o ajuste dos parâmetros de captura da imagem 3D da ferramenta, onde é informada ao software do microscópio a posição angular da ferramenta em relação ao microscópio, a altura mínima e máxima do foco e a resolução desejada da imagem.

Assim, a captura da imagem é realizada a partir da geração de uma nuvem de pontos, os quais constituem a imagem 3D da ferramenta, conforme Figura 3.3-b.

Figura 3.3 – Processo de medição das ferramentas de corte no Microscópio de Foco Infinito Alicona.

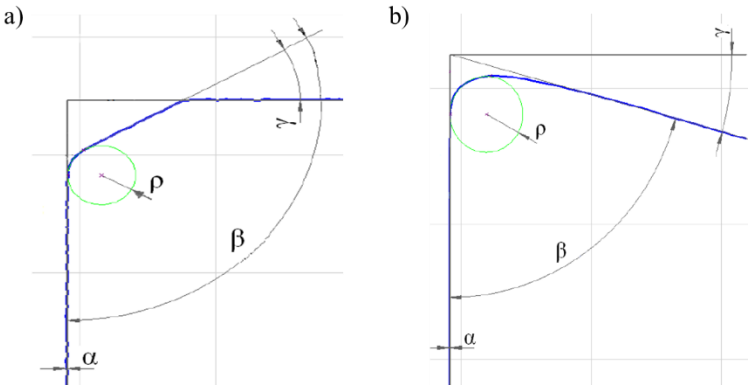


FONTE: Do autor.

O *software* do microscópio permite a medição de elementos, tais como geometria, rugosidade, forma etc. Ao seccionar o inserto por um plano numa determinada posição, uma imagem projetada deste corte é gerada, em que é possível traçar linhas retas auxiliares, círculos e realizar a medição do ângulo relativo entre estas linhas.

Neste trabalho, os cortes no gume da ferramenta foram realizados paralelos ao vetor velocidade de corte e, deste modo, pôde-se medir o ângulo de incidência α , ângulo de saída γ e raio de gume ρ . Assim, foram feitas as medições de todos os gumes das ferramentas, totalizando 72 gumes: 36 gumes da ferramenta de metal-duro e 36 gumes da ferramenta de PCBN. A Figura 3.4 e a Tabela 3.1, respectivamente, apresentam os perfis e medidas obtidas para os dois tipos de insertos empregados nos ensaios.

Figura 3.4 – Perfil do inserto de a) PCBN e de b) metal-duro de grãos ultrafinos.



FONTE: Acervo do Grupo GUME.

Tabela 3.1– Características dos insertos de PCBN e metal-duro.

Características	Inserto de PCBN	Inserto de metal-duro
Tipo	Classe H	Classe P
Revestimento	Sem revestimento	Al ₃ O ₂
Raio do gume	24,3 ± 5,26 μm	28,01 ± 2,89 μm
Ângulo de saída	- 29,71 ± 0,26 °	+ 15,32 ± 1,29 °
Ângulo de incidência	-0,21 ± 0,12 °	- 0,12 ± 0,10 °
Ângulo de cunha	119,92 ± 0,29 °	74,80 ± 1,29 °

FONTE: Acervo do Grupo GUME.

Após a caracterização das ferramentas, elas foram montadas em um suporte de torneamento externo (ISO DSBNR2020K) e fixadas por meio de grampo, conforme Figura 3.5.

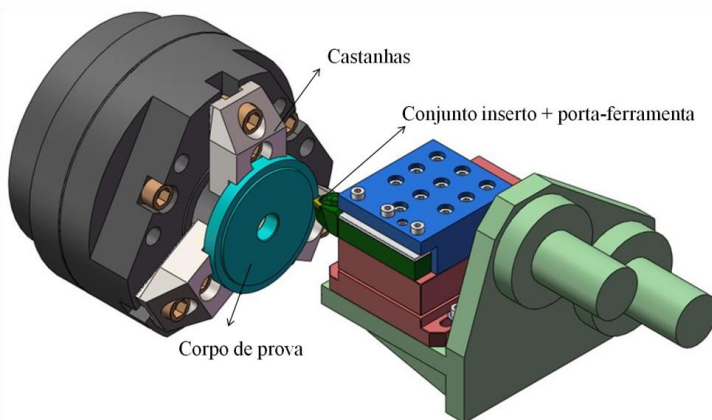
Figura 3.5 – Porta-ferramenta com pastilha montada utilizado nos ensaios de torneamento.



FONTE: Acervo do Grupo GUME.

Com o objetivo de conferir rigidez e estabilidade dinâmica ao sistema de fixação do corpo de prova, e minimizar as distorções dimensionais ao longo dos experimentos, foram projetadas e utilizadas castanhas beneficiadas fabricadas de aço AISI 4340 (40 ± 1 HRC). A Figura 3.6 mostra uma representação esquemática do sistema de usinagem, evidenciando a placa com peça montada, o suporte da plataforma piezelétrica com ferramenta montada.

Figura 3.6 – Sistema de fixação utilizado no ensaio de torneamento.



FONTE: Acervo do Grupo GUME.

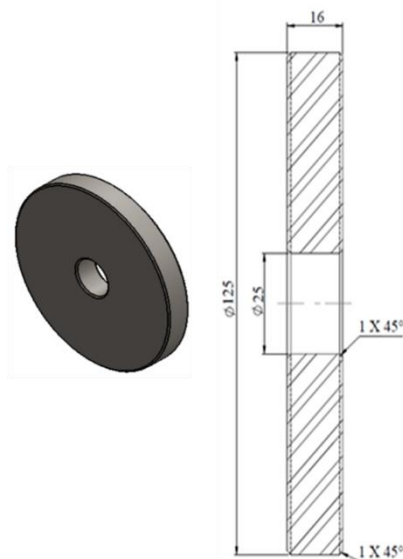
3.3 CORPOS DE PROVA

Para a realização dos ensaios e confecção dos corpos de prova, os materiais foram adquiridos na forma de barras laminadas, as quais foram produzidas num mesmo lote, a fim de evitar discrepâncias de composição química e, conseqüentemente, garantir que os corpos de prova estejam enquadrados dentro de um mesmo padrão de qualidade. Posteriormente, foi realizada a usinagem do material no Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação do Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, para obtenção das dimensões finais do corpo de prova.

O corpo de prova obtido e suas respectivas dimensões encontram-se na Figura 3.7. A escolha desta geometria foi baseada em Diniz e Oliveira [11], pois esta garante maior rigidez aos experimentos, já que o comprimento em balanço se torna pequeno. Desta forma, garante-se aos experimentos e os resultados obtidos não sejam influenciados pelas vibrações do processo, as quais podem gerar avarias nas ferramentas ou

imperfeições na superfície da peça usinada. Além disso, o corte pode ser realizado no sentido radial, garantindo o maior aproveitamento do volume do corpo de prova.

Figura 3.7 - Representação esquemática do corpo de prova utilizado nos ensaios.



FONTE: Acervo do Grupo GUME.

A fim de minimizar os choques na entrada e saída da ferramenta, foram realizados chanfros dos diâmetros interno e externo do corpo de prova, com dimensões de 1 x 45°. O furo no centro do corpo de prova ($\varnothing = 25\text{mm}$) tem por finalidade garantir a manutenção da velocidade de corte constante programada, decorrente do limite de rotações da máquina ferramenta.

Obtidas as dimensões e a geometria desejadas para os corpos de prova, os mesmos foram submetidos ao processo de tratamento térmico, na empresa Tecnotêmpera (Guaramirim – SC), de têmpera e revenimento, para atingirem as durezas solicitadas – a saber – 35 ± 1 ; 40 ± 1 ; 45 ± 1 ; 50 ± 1 ; 55 ± 1 e 60 ± 1 HRC.

3.4 MATERIAIS DO ENSAIO

Os materiais utilizados nestes ensaios são os aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2. A escolha destes materiais deve-se à ampla aplicação

dos mesmos em diversos setores industriais, desde a fabricação de engrenagens até a produção de rolamentos e matrizes.

Os aços AISI D2 e AISI 52100 foram fornecidos pela empresa Villares Metals e o aço AISI 4340 pela empresa Favorit. A fim de verificar se a constituição dos materiais atende às normas especificadas pelo American Iron and Steel Institute (AISI), foram realizadas análises de composição química para os três materiais. Verificou-se que os aços se encontram dentro dos padrões especificados.

A Tabela 3.2 apresenta a composição química dos materiais empregados neste trabalho, sendo que nesta consta somente os elementos principais, sendo que os demais (exceto o ferro (Fe)), por apresentarem teores insignificantes, foram considerados elementos residuais.

Tabela 3.2 - Composição química (% em massa) dos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2.

Aço	C	Mn	P	Si	Ni	Cr	Mo	V
AISI 4340 (norma)	0,38 0,43	0,6 0,8	0,035 máx	0,15 0,35	1,65 2,00	0,70 0,90	0,20 0,30	-
AISI 4340 (medido)	0,39	0,67	0,02	0,27	1,74	0,76	0,22	-
AISI 52100 (norma)	0,98 1,10	0,24 0,45	0,025 máx	0,15 0,35	-	1,30 1,60	-	-
AISI 52100 (medido)	1	0,37	0,015	0,26	-	1,46	-	-
AISI D2 (norma)	1,40 1,60	0,60 máx	0,035 máx	0,60 máx	0,30 máx	11,0 13,0	0,70 1,20	1,10 máx
AISI D2 (medido)	1,53	0,34	0,02	0,35	0,22	11,66	0,76	0,80

FONTE: Metals-Handbook [37], Favorit [85] e Villares Metals [86].

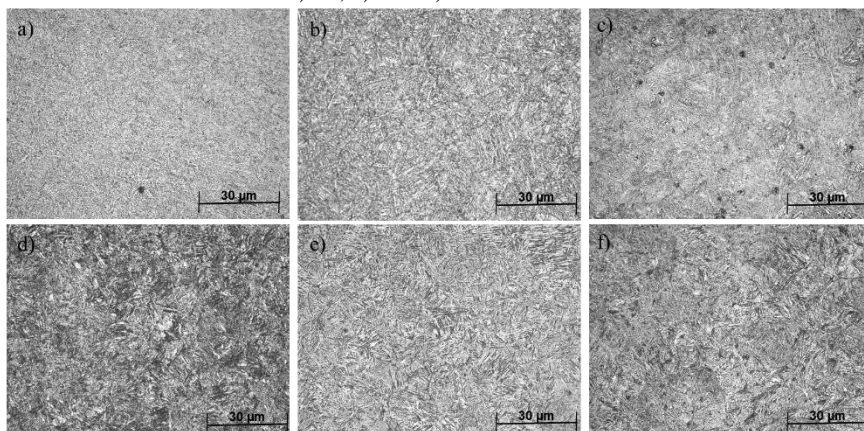
Destes materiais, como visto no item anterior, foram obtidos os corpos de prova dos ensaios, os quais posteriormente foram submetidos a tratamento térmico para obtenção dos valores de dureza desejados. Para atingir os patamares de dureza, foram realizadas as operações de têmpera seguido do revenimento. Cada dureza possui seu ciclo específico, de acordo com a curva TTT e de revenimento. Considerando a criticidade da operação, torna-se pertinente ressaltar que estes procedimentos foram realizados por uma empresa terceirizada (Tecnotêmpera) especializada neste tipo de operação.

Realizada esta etapa, foram obtidas amostras de cada aço devidamente tratado, para realização da caracterização microestrutural

dos materiais. Para este procedimento, foi realizada a preparação metalográfica das amostras.

A Figura 3.8 apresenta as microestruturas das amostras do aço AISI 4340, em seis níveis de dureza.

Figura 3.8 - Microestrutura do aço AISI 4340 nas durezas de a) 35, b) 40, c) 45, d) 50, e) 55 e f) 60 HRC.

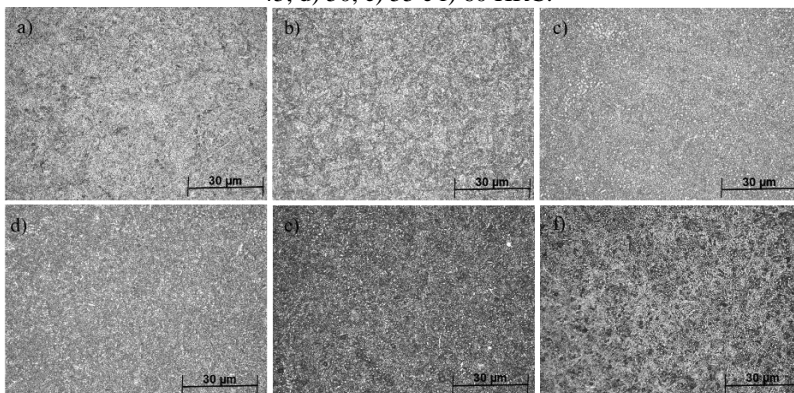


FONTE: Do autor.

Para as durezas entre 35 e 45 HRC, a microestrutura deste aço é formada principalmente por bainita, constituinte que se caracteriza por partículas alongadas de cementita (Fe_3C) dentro de uma matriz ferrítica proporcionando maior dureza e ductilidade ao material. Entretanto, a partir de 50 HRC, verifica-se o aparecimento de partículas em forma de agulha referentes à fase martensítica. De acordo com a literatura, essa microestrutura de transição garante ao aço maior dureza e resistência mecânica.

O mesmo procedimento foi realizado com o aço AISI 52100, o qual apresenta uma composição química e microestrutura bem distintas do aço anterior, conforme Figura 3.9.

Figura 3.9 – Microestrutura do aço AISI 52100 nas durezas de a) 35, b) 40, c) 45, d) 50, e) 55 e f) 60 HRC.

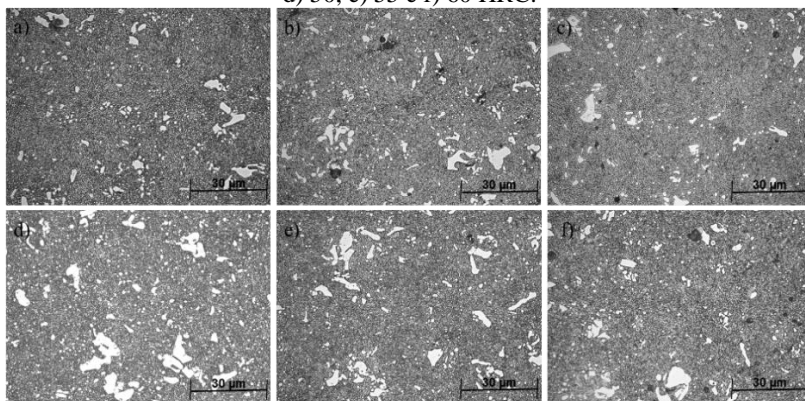


FONTE: Do autor.

O aço AISI 52100 apresenta pequenos carbonetos eutéticos, do tipo M_7C_3 , distribuídos homogeneamente em uma matriz ferrítica, que são revelados como partículas brancas observadas nas micrografias. A forma como estão distribuídos garante melhores propriedades mecânicas devido à diminuição do gradiente de temperatura. Além disso, com a elevação da dureza, a matriz antes formada por bainita e austenita retida, começa a ter maior presença de martensita.

Esse mesmo tipo de carboneto é encontrado na microestrutura do aço AISI D2, porém com dimensões maiores, conforme Figura 3.10.

Figura 3.10 – Microestrutura do aço AISI D2 nas durezas de a) 35, b) 40, c) 45, d) 50, e) 55 e f) 60 HRC.



FONTE: Do autor.

A microestrutura deste aço é basicamente formada por carbonetos M_7C_3 de forma e dimensões bastante variadas e por carbonetos secundários dispersos numa matriz ferrítica. Vale ressaltar que a tenacidade deste material é fortemente dependente da distribuição dos carbonetos eutéticos. Devido a essas características, o aumento da dureza e o conseqüente encruamento do material, proporcionam a este aço maior resistência ao cisalhamento, fator esse que dificulta o processo de usinagem.

4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo foram descritas as metodologias desenvolvidas para a realização da análise da textura e das alterações microestruturais. Todas as análises propostas neste trabalho foram realizadas nos corpos de prova após o processo de torneamento, com a manutenção constante dos parâmetros de corte, nos três diferentes aços - AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 - e com dois tipos de materiais de ferramenta de corte - PCBN e metal-duro.

4.1 ENSAIOS DE TORNEAMENTO

Para fixação e posicionamento do corpo de prova, foram projetadas e fabricadas castanhas, as quais têm a finalidade de reduzir os efeitos da vibração, garantindo maior rigidez e estabilidade à peça. As castanhas foram fabricadas no Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação da UNIFEBE e posteriormente foram submetidas ao processo de torneamento, com a realização de um único passe, a fim de garantir a fixação e posicionamento adequados entre o par castanha - corpo de prova, conforme a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Conjunto de fixação do corpo de prova nos ensaios de torneamento.



FONTE: Do autor.

Após o posicionamento e fixação do corpo de prova, o inserto foi fixado ao porta-ferramenta e a superfície a ser usinada foi preparada, realizando-se um passe sobre a peça. A finalidade deste procedimento foi

criar uma superfície de referência, a fim de minimizar o batimento radial do corpo de prova após a fixação. Na sequência à criação da superfície de referência, os gumes das ferramentas utilizados na regularização da superfície foram substituídos.

Posteriormente, deu-se início aos ensaios de torneamento, os quais consistiram na realização de um único passe no sentido radial (do diâmetro maior para o diâmetro menor), sem o emprego de meios lubrificantes. Além disso, estabeleceu-se que cada ensaio sempre seria realizado com o gume novo da ferramenta. Os parâmetros de usinagem adotados, apresentados na Tabela 4.1, mantiveram-se constantes ao longo dos experimentos.

Tabela 4.1 – Parâmetros de corte dos ensaios de torneamento.

Parâmetro de corte	Valor
Velocidade de corte (v_c)	150 m/min
Avanço (f)	0,08 mm
Profundidade de corte (a_p)	0,20 mm

FONTE: Do autor.

Os ensaios de torneamento foram realizados nos aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2 em seis distintos valores de dureza, conforme planejamento estruturado na Tabela 4.2. As variáveis de entrada que foram utilizadas geraram 36 combinações, ou seja, trinta e seis experimentos, totalizando 72 definitivos considerando uma réplica.

A escolha destas variáveis teve por finalidade compreender os múltiplos comportamentos dos materiais e das ferramentas de corte empregadas, de modo a conseguir verificar as possibilidades e limitações existentes no processo.

Tabela 4.2 – Variáveis de entrada dos experimentos.

Materiais		Ferramentas		Durezas (HRC)
AISI 4340	X	PCBN Metal-duro	X	35
AISI 52100				40
				45
				50
				55
AISI D2				60

FONTE: Do autor.

4.2 ANÁLISE DAS RUGOSIDADES 2D E 3D

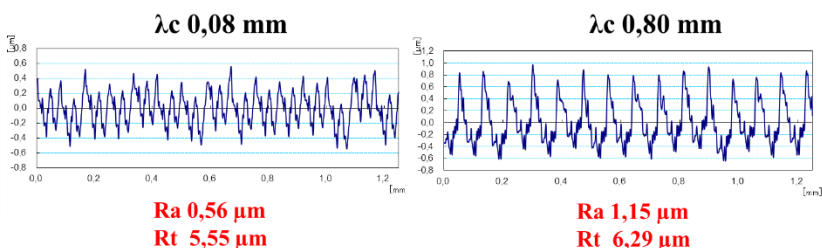
Para a realização das medições da rugosidade 2D e 3D, primeiramente foi necessário verificar quais seriam os parâmetros a serem utilizados, como filtro, *cut-off* (λ_c) e comprimento de análise, os quais são necessários para a obtenção do perfil de rugosidade da superfície.

O *cut-off* (λ_c) refere-se ao comprimento de amostragem e segundo a norma ISO 4287/1997, é recomendado que seja feita a medição de cinco comprimentos de amostragem, sendo indicado o valor médio resultante, o qual leva em consideração os seguintes critérios:

- Para a rugosidade, o valor do *cut-off* é o mais longo comprimento de onda nominal a ser incluído na rugosidade;
- Elevados comprimentos de onda são eliminados pelo filtro. Pequenos comprimentos de onda são incluídos na rugosidade;
- Comprimentos de onda maiores que o *cut-off* da rugosidade são usualmente incluídos em ondulações.

A escolha do valor do *cut-off* é essencial para que as medições sejam verdadeiramente representativas da superfície analisada. A escolha incorreta deste parâmetro pode provocar alterações bruscas nos valores obtidos, como pode ser visto na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Comparação dos valores dos parâmetros obtidos com diferentes valores de *cut-off* (λ_c).



FONTE: Do autor.

A norma ISO 4288/1996 indica os parâmetros a serem utilizados para cada tipo de processo de usinagem, classificando-os em perfis periódicos e não periódicos, conforme a Tabela 4.3.

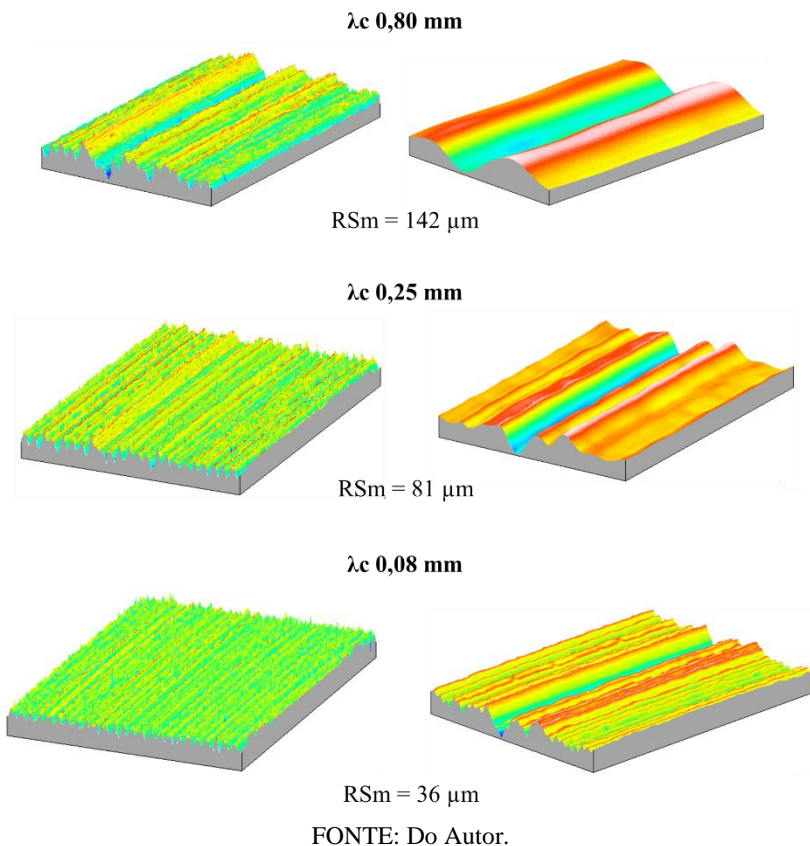
Tabela 4.3 - Condições de medição da rugosidade da superfície.

Perfis não periódicos		Perfis periódicos	Condições de medição segundo as normas ISO 4288 e ISO 3274	
Brunimento, lapidação, Retificação		Torneamento, fresamento	l_r comprimento de amostragem (mm)	l_n comprimento total da amostra (mm)
Rt, Rz (μm)	Ra (μm)	RSm (mm)	$\lambda_c = l_r$	l_n
>0,025...0,1	>0,006...0,02	>0,013...0,04	0,08	0,4
>0,1...0,5	>0,02...0,1	>0,04...0,13	0,25	1,25
>0,5...10	>0,1...2	>0,13...0,4	0,8	4
>10...50	>2...10	>0,4...1,3	2,5	12,5
>50...200	>10...80	>1,3...4	8	40

FONTE: [87].

Usualmente utiliza-se o *cut-off de* 0,80 mm. Entretanto, para a realização dos ensaios, verificou-se que esta condição não seria a mais adequada, já que uma ferramenta nova realizará um único passe sobre o corpo de prova e com isso, espera-se pouca alteração da rugosidade ao longo dos ensaios. Ou seja, o valor extraído com um λ_c de 0,80 mm seria relativo à ondulação gerada na superfície e não ao perfil de rugosidade, como pode ser verificado a partir da comparação dos perfis gerados, na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Comparação dos perfis, respectivamente, de rugosidade e de ondulação para diferentes comprimentos de amostragem.



De acordo com a Figura 4.3 e com o disposto na norma ISO 4288/1996, a qual leva em consideração, o processo de usinagem empregado para obtenção da superfície, verifica-se que o comprimento de amostragem de 0,25 mm melhor se adequa ao processo de torneamento, sendo que valor obtido para o parâmetro R_{Sm} encontra-se na faixa de valores proposto pela norma.

Além disso, observa-se o λ_c de 0,25 mm consegue extrair o real perfil de rugosidade da superfície, em contraposição ao *cut-off* de 0,80 mm, apesar desse ser amplamente utilizado em trabalhos científicos e no ambiente. Por outro lado, o *cut-off* de 0,08 mm, por se tratar de um filtro

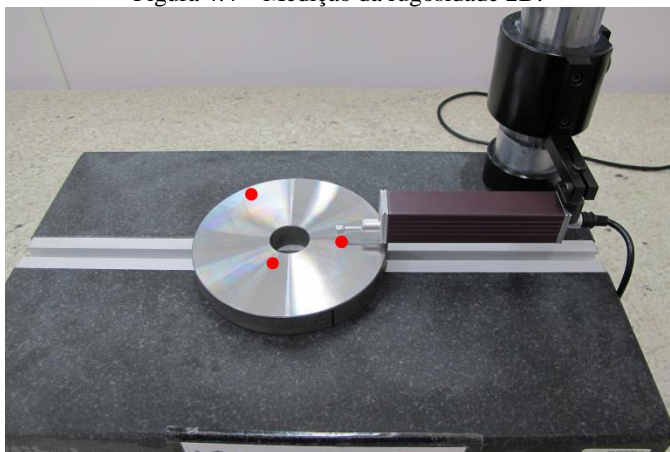
mais minucioso, acaba por suprimir informações importantes sobre a superfície, não conseguindo caracterizá-la de forma adequada.

A possível explicação para a melhor adequação do λ_c de 0,25 mm está relacionado às condições do processo, o qual ao realizar somente um passe sobre a peça, com o emprego de um gume novo da ferramenta de corte, o perfil gerado na superfície será relativo à geometria da ferramenta. Vale ressaltar, entretanto, que alterando os parâmetros do processo, nova avaliação deve ser realizada.

Posteriormente, definiram-se as condições para a análise da rugosidade 2D. Com a finalidade de obter um conjunto de dados que permitam uma representação próxima à realidade e que abranjam de forma mais ampla os diversos fenômenos presentes na superfície, foram realizadas três medições, com um distanciamento de 120° entre cada, variando entre a periferia, o meio e o centro do corpo de prova.

A definição para realizar medições em três regiões diferentes de cada conjunto, percorrendo do diâmetro maior para o menor, teve por finalidade abarcar de forma mais ampla os efeitos da usinagem do corpo de prova sobre a condição da superfície, conforme Figura 4.4.

Figura 4.4 – Medição da rugosidade 2D.



FONTE: Do autor.

Definidos estes parâmetros, para a medição da rugosidade 2D foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo® SJ-310, disponível no Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE). O equipamento permite a obtenção não somente dos valores dos parâmetros de rugosidade (norma

ISO 4287/1997), mas também o perfil de rugosidade da superfície e sua respectiva curva de Abbott.

O transdutor com a agulha de diamante encontra-se instalado em um adaptador vertical, o que permite o correto nivelamento com o corpo de prova a ser medido. Além disso, este conjunto encontra-se instalado sobre uma mesa de granito, a fim de evitar que vibrações e instabilidades do ambiente afetem a realização dos ensaios, como pode ser visto na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Etapas para medição da rugosidade 2D.



FONTE: Do autor.

Assim, primeiramente foi realizado o ajuste dos parâmetros a serem utilizados no ensaio. Posteriormente, realizou-se a limpeza do corpo de prova a ser medido com álcool etílico 95%, a fim de que impurezas ou resíduos existentes não afetassem a obtenção dos dados. Concluída esta etapa, posicionou-se o detector com agulha de diamante sobre o corpo de prova a fim de dar início ao processo de medição. Os

dados obtidos são visualizados tanto no *display* do rugosímetro quanto exportados para o computador.

Posteriormente, dos dados obtidos, foram extraídas as médias e suas respectivas incertezas.

A medição da rugosidade 3D diferencia-se da medição em duas dimensões por avaliar a rugosidade em uma área, fornecendo dados sobre a distribuição e regularidade na terceira dimensão. A representação 3D permite concluir com mais facilidade sobre aspectos tribológicos da peça. Outro fator que justificou a utilização desta análise foram os dados previamente obtidos na análise da rugosidade 2D do aço AISI 4340, com durezas de 35 e 55 HRC, usinado com ferramentas de metal-duro e PCBN [88].

Para a medição da rugosidade 3D foi utilizado o equipamento interferômetro Zygo® NewView™ 7300, disponível no Laboratório de Materiais (LABMAT), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), conforme Figura 4.6.

A interferometria óptica é uma técnica que utiliza a interferência entre ondas luminosas para realizar medições. Em essência, consiste em dividir feixes de luz, fazendo com que percorram caminhos diferentes, e recombiná-los para produzirem padrões visuais na forma de franjas de interferência, as quais serão responsáveis pela medição da rugosidade da superfície.

Figura 4.6 – Interferômetro de luz branca para medição de rugosidade 3D.

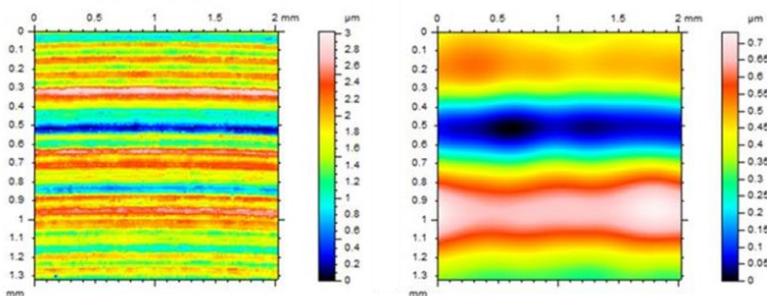


FONTE: Do autor.

Para a análise da rugosidade 3D, primeiramente foi feita a limpeza do corpo de prova com álcool etílico 95% e este foi posicionado sobre a mesa do equipamento. Posteriormente, realizou-se a definição dos parâmetros de medição e análise no software MetroPro® para análise de uma área de 1mm². Além disso, foi feito o ajuste de foco da imagem e a distribuição das franjas de interferência sobre a superfície. Foi realizada uma medição para cada corpo de prova, sendo que para cada medição são feitas cinco avaliações da área definida, e o resultado gerado trata-se da média dessas cinco varreduras. Devido a isso, para esta análise não foi possível obter os valores de incerteza.

Feitas as medições desejadas, é gerado um arquivo .txt, o qual necessita de um programa para que seja feita a leitura dos dados. Neste caso em específico, utilizou-se o *software* MountainsMap® para tratar os dados obtidos e gerar os gráficos e perfis desejados. Nesta etapa de tratamento dos dados foi empregado o *cut-off* de 0,25 mm para que fossem gerados os perfis de rugosidade e ondulação (Figura 4.7), a topografia da superfície, a respectiva curva de Abbott e os parâmetros 3D.

Figura 4.7 - Perfis de rugosidade e ondulação, respectivamente.



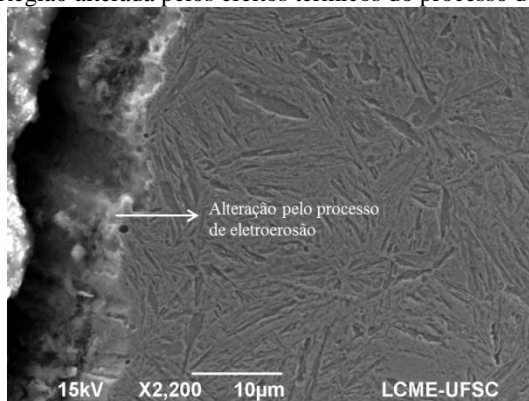
FONTE: Do autor.

4.3 ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS

Após os ensaios de torneamento, os corpos de prova já usinados foram cortados em seção transversal. Para realização deste procedimento, utilizou-se o processo de usinagem por jato de água. A escolha desta operação de corte deve-se ao mínimo efeito térmico sobre a superfície usinada, de modo que não venha a influenciar a análise das camadas da subsuperfície.

Durante a realização dos pré-ensaios, foram feitos cortes com a utilização do processo de eletroerosão. Entretanto, por ser um processo basicamente térmico, danos foram causados à superfície, os quais, mesmo após o procedimento metalográfico, não foram eliminados, como pode ser visto na Figura 4.8

Figura 4.8 - Região alterada pelos efeitos térmicos do processo de eletroerosão.

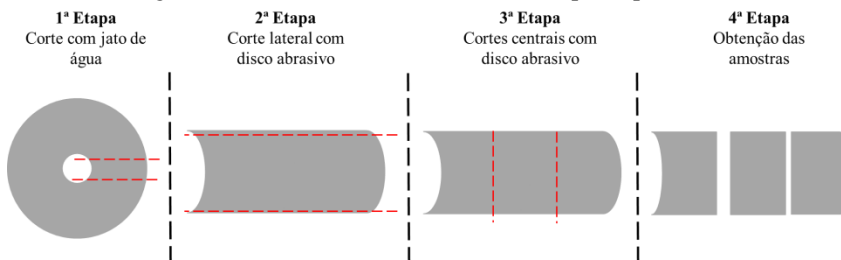


FONTE: Do Autor.

Os segmentos obtidos pelo corte com jato de água abrasivo foram diminuídos no tamanho para serem embutidos e analisados por metalografia. Este corte foi efetuado por disco abrasivo em máquina de corte IsoMet 4000, disponível no Laboratório de Materiais (LABMAT) da UFSC. Este procedimento é recomendado para a obtenção de amostras para metalografia, afetando minimamente a região de corte devido a utilização de fluido lubrificante e a possibilidade de controlar os parâmetros de corte, de modo que a superfície não seja exposta a severas alterações.

Assim, foram realizados cortes nas laterais, para eliminação do arredondamento (proveniente do corte com jato de água) e em duas regiões no meio do corpo de prova, a fim de obter as amostras para realização dos ensaios. Para esta análise, foi selecionada a amostra da região próxima ao diâmetro interno. A Figura 4.9 apresenta as etapas dos procedimentos de corte realizados.

Figura 4.9 – Procedimentos de corte do corpo de prova.

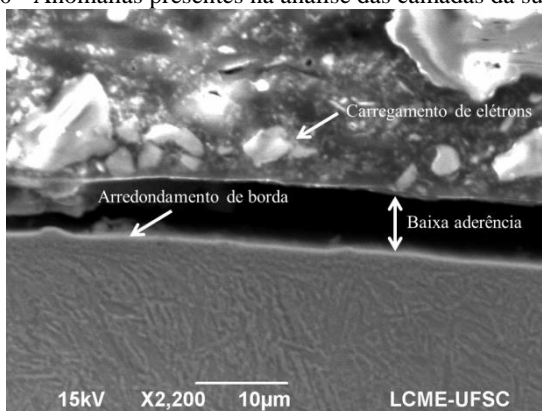


FONTE: Do autor.

Concluído o corte das amostras, foi realizado o procedimento metalográfico. Esta análise busca visualizar a ocorrência de alterações na microestrutura do material, substancialmente nas camadas abaixo da superfície usinada. Devido a ocorrência de arredondamento da borda ocasionado pelo polimento da amostra, efeito esse que pode prejudicar a análise das camadas da subsuperfície, o procedimento metalográfico é uma etapa crucial para obtenção de resultados satisfatórios.

Alguns procedimentos foram realizados anteriormente à preparação metalográfica da amostra, devido a anomalias observadas durante os pré-ensaios, com pode ser observado na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Anomalias presentes na análise das camadas da subsuperfície.



FONTE: Do Autor.

A baixa aderência refere-se ao espaçamento existente entre a resina polimérica e a amostra, que pode ter ocorrido pela ausência de revestimento ou devido aos valores de temperatura e pressão empregados

no embutimento. O arredondamento de borda é gerado pelo polimento da amostra, impedindo a verificação da região que sofreu alteração microestrutural. Já o carregamento eletrostático da superfície da amostra, ou seja, a concentração de elétrons na região da resina polimérica deve-se ao fato desta ser um material isolante.

Assim, as amostras já cortadas e limpas foram submetidas a um revestimento com folhas de alumínio (Figura 4.11). Posteriormente foi realizado o embutimento. Para evitar o efeito de arredondamento, foi utilizada uma primeira camada de resina epóxi termoendurecedora, a qual é recomendada para a retenção de bordas e a outra camada composta por resina sintética (baquelite).

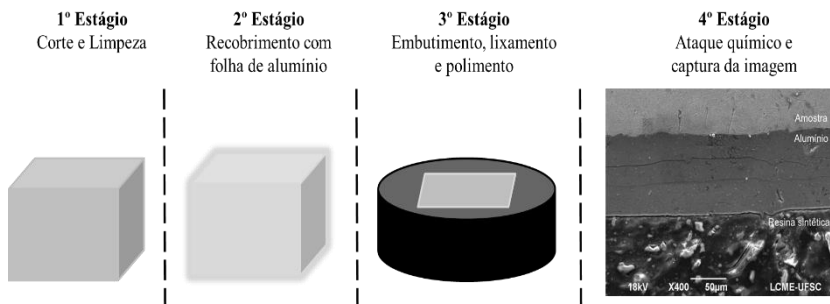
A embutidora foi programada para o aquecimento a 150 °C, mantendo-se nesta temperatura durante 10 minutos, a uma pressão de aproximadamente 14,7MPa (150kg.f.cm⁻²). O resfriamento deu-se por cerca de 5 minutos com água corrente dentro do cilindro de embutimento. A manutenção destes parâmetros é necessária para permitir a melhor aderência entre a amostra e a resina.

Posteriormente foi realizado o lixamento, o qual ocorreu através da seguinte ordem crescente de granulometria das lixas, em Mesh: 80, 120, 220, 400, 600 e 1200. Entre cada troca de lixa, foi realizada a limpeza das amostras em ultrassom com álcool etílico 95%, a fim de evitar que grãos abrasivos da lixa anterior, que porventura tenham ficado aderidos, contaminassem a lixa nova e promovessem riscos na superfície em análise.

Dando continuidade ao procedimento metalográfico, as amostras foram submetidas ao polimento com pasta de diamante, com granulometrias de 3µm e 1µm. De forma análoga, foi realizada a limpeza da amostra entre cada uma das etapas.

Após o polimento, foi realizado o ataque químico das amostras, o qual permite que a microestrutura seja revelada. Como todas as amostras são aços de médio e alto teor de carbono, utilizou-se o Nital 2% como reagente, realizando a imersão a frio de cada amostra por um período de 15 s, com posterior limpeza e secagem das amostras. Os procedimentos básicos de preparação metalográfica podem ser vistos da Figura 4.11.

Figura 4.11 – Etapas da preparação metalográfica.



FONTE: Do autor.

Após o ataque químico, foram realizadas capturas das imagens da microestrutura do material nas regiões de interesse, em especial nas camadas abaixo da superfície usinada, com auxílio do Microscópio Óptico e do Microscópio Eletrônico de varredura (MEV). Estes procedimentos foram realizados no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM) e no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME).

4.4 ANÁLISE DE PERIL

A fim de verificar possíveis alterações quanto à planeza, foi realizada a análise do perfil, com a avaliação de 70 pontos ao longo do corpo de prova usinado. Para esta etapa foi utilizada a Máquina de Medição Tridimensional Crysta-Plus M443, disponível no Centro de Tecnologia e Inovação em Fabricação (CTIF) do Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE). O equipamento e, em destaque, o padrão que define os pontos de medição são mostrados na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Análise do perfil do corpo de prova usinado.



Fonte: Do autor.

5 RESULTADOS

Neste capítulo foram discutidos os resultados obtidos no torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e metal-duro de grãos ultrafinos. Para facilitar a compreensão do assunto, o capítulo foi dividido em dois tópicos principais, rugosidades (2D e 3D) e alterações microestruturais.

No primeiro foram abordados os resultados obtidos para análise dos parâmetros de rugosidade 2D e 3D: Ra, Sa, Rt, St, Rz e Sz, a fim de verificar as diferenças ou similaridades existentes entre os mesmos. Posteriormente, foram avaliadas as curvas de Abbott-Firestone e os perfis e topografias gerados, permitindo assim uma análise mais apurada das características funcionais das superfícies obtidas.

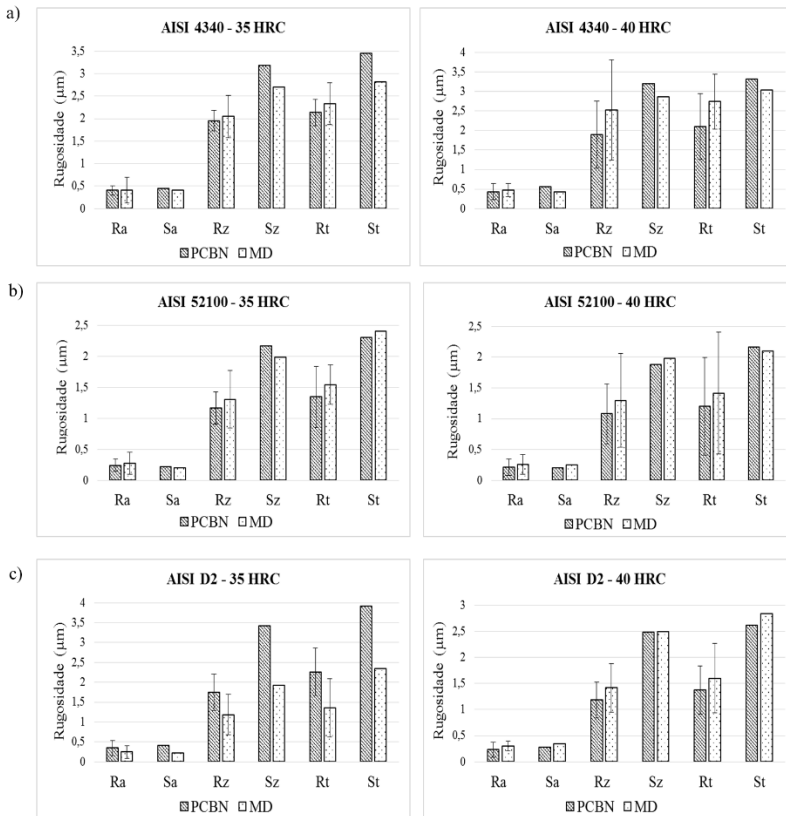
No segundo tópico foram analisadas as alterações microestruturais presentes nos três materiais avaliados, nas seis condições de dureza. Desta forma, pretendeu-se verificar o grau de influência do processo de torneamento nas camadas da subsuperfície utilizando ferramentas distintas, no caso, PCBN e metal-duro.

5.1 RUGOSIDADES 2D E 3D

Inicialmente foi realizado o levantamento dos valores dos parâmetros de rugosidade 2D, conforme a norma ISO 4287/1997. Para um intervalo de confiança de 95%, dos valores obtidos, foram extraídas a média do conjunto e sua respectiva incerteza. O mesmo procedimento foi realizado com os parâmetros de rugosidade 3D. Entretanto, neste caso não foi possível obter os valores de incerteza, já que foi realizada uma única medição da superfície, sendo que cada medição corresponde à média de cinco varreduras da área selecionada, sendo fornecido somente o valor médio final obtido.

A Figura 5.1 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade analisados para os três materiais, em dois níveis de dureza – 35 e 40 HRC.

Figura 5.1 – Parâmetros de rugosidade 2D e 3D para as durezas de 35 e 40 HRC para o aço a) AISI 4340, b) AISI 52100 e c) AISI D2.



FONTE: Do autor.

A partir da Figura 5.1, observa-se que para as seis condições analisadas, as ferramentas de PCBN e metal-duro apresentam desempenho similar. Entretanto, comparando os parâmetros de rugosidade 2D e 3D, verifica-se os parâmetros Ra e Sa apresentaram valores aproximados, condição essa confirmada após realização de teste de hipótese, sendo que não houve evidências suficientes para concluir que as médias diferem no nível de significância de 0,05. Porém tal afirmação já não pode ser estendida para os parâmetros Sz e St, os quais diferem dos seus correspondentes no plano 2D. Esta variação deve-se principalmente ao fato de que os parâmetros Sz e St têm a sua definição baseada na

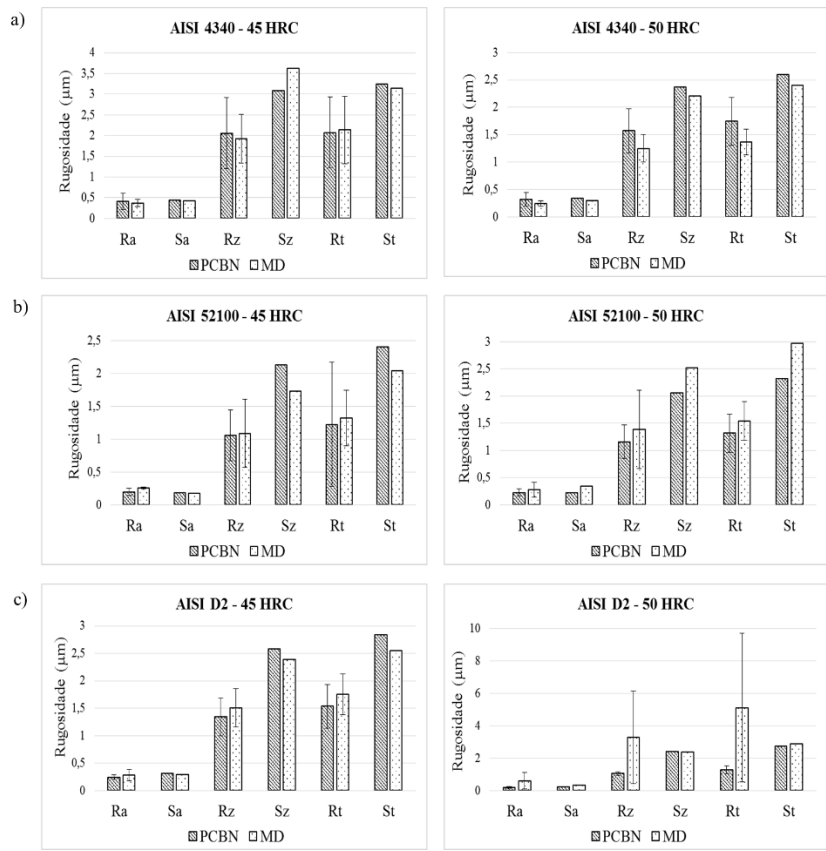
distância entre picos e vales. Griffiths [1] afirma que a definição de vales e picos é ainda um problema presente na maioria dos parâmetros 3D. No caso da análise 2D, um pico é o valor mais elevado entre os dois vizinhos, ao longo da linha média do perfil. Já na análise 3D, um pico pode ser definido por diversos critérios, tipicamente em relação a quatro ou oito vizinhos próximos. Assim, cada definição pode produzir diferentes resultados.

Analisando um patamar de dureza superior – a saber – 40 HRC, verifica-se que para todos os materiais usados os valores de rugosidade não diferenciam-se daqueles obtidos para a avaliação anterior. Tal afirmação foi comprovada após a realização da análise de variância (ANOVA), em que pôde-se concluir que a dureza, para estas condições, não foi o fator determinante no desempenho da rugosidade.

No que tange os materiais avaliados, verifica-se que o aço AISI 52100, dentre os três, foi o que apresentou menores valores de rugosidade. Este comportamento está relacionado às propriedades deste material, o qual é capaz de suportar altas tensões de contato e possui maior estabilidade em condições mais severas. O teor de carbono e cromo associado a presença de carbonetos eutéticos dispersos na matriz deste aço proporcionam tais características [46], [47].

Avaliando outros dois patamares de dureza, 45 e 50 HRC, conforme Figura 5.2, verifica-se que para 45 HRC, os valores de rugosidade obtidos para os três materiais encontram-se dentro da mesma faixa dos resultados obtidos para a condição da análise anterior, não podendo-se afirmar que os mesmos diferem entre si. Entretanto, no que tange um patamar de dureza superior, verifica-se que a rugosidade do aço AISI D2 apresentou um comportamento diferente dos demais aços.

Figura 5.2 – Parâmetros de rugosidade 2D e 3D para as durezas de 45 e 50 HRC para o aço a) AISI 4340, b) AISI 52100 e c) AISI D2.



FONTE: Do autor.

Além disso, para estes citados casos, as duas ferramentas de corte apresentam desempenho similar, ou seja, os valores dos parâmetros de rugosidade avaliados não diferem muito entre si. Diante disso, pode-se afirmar que as ferramentas de PCBN e metal-duro, apesar das diferenças de propriedade e geometria, permitem obter acabamentos com qualidades similares.

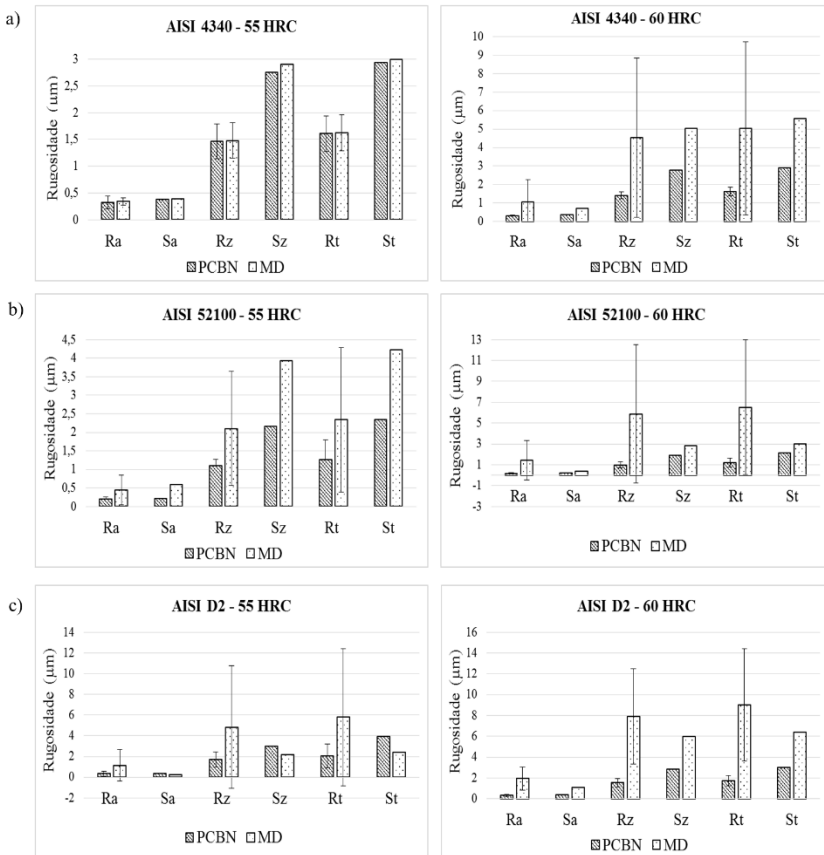
Entretanto, analisando especificamente o caso do aço AISI D2, com dureza de 50 HRC, verifica-se que os valores de rugosidade obtidos com a ferramenta de metal-duro aumentam bruscamente. Além disso, a elevação das incertezas dos parâmetros sinalizam a existência de

alterações ao longo do processo. Uma possível explicação para este fenômeno está relacionado ao aumento da força de usinagem e da resistência mecânica do material, provocando o maior desgaste da ferramenta de corte a qual, consequentemente, eleva os valores de rugosidade e gera um acabamento inferior ao obtido com a ferramenta de PCBN.

Além disso, este material é difícil de ser usinado por apresentar carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 , os quais possuem dureza quase três vezes maior que a dureza da matriz dos aços-rápidos. Além disso, como apontam Oliveira, Boing e Schroeter [84], esses carbonetos podem ficar aderidos à superfície, gerando topografias com irregularidades e maior presença de picos, provocando a elevação dos parâmetros Rz, Sz, Rt e St.

Para os últimos valores de dureza, 55 e 60 HRC, os valores dos parâmetros de rugosidade constam na Figura 5.3

Figura 5.3 – Parâmetros de rugosidade 2D e 3D para as durezas de 55 e 60 HRC para o aço a) AISI 4340, b) AISI 52100 e c) AISI D2.



FONTE: Do autor.

Pela análise da Figura 5.3, verifica-se que para a dureza de 60 HRC, todos os três materiais usinados com ferramenta de metal-duro apresentam valores rugosidade muito elevados, já que nesta condição as ferramentas devem ter sofrido um severo desgaste. Por outro lado, apesar da alteração das condições do processo, a ferramenta de PCBN somente acarretou um sutil aumento dos valores de rugosidade.

Além disso, uma possível explicação para o aumento severo das incertezas pode estar relacionado a instabilidades que surgiram ao longo do processo, as quais devem estar associadas ao aumento do desgaste das

ferramentas, à elevação dos gradientes de temperaturas, à dificuldade de escoamento do cavaco e ao aumento da força de usinagem.

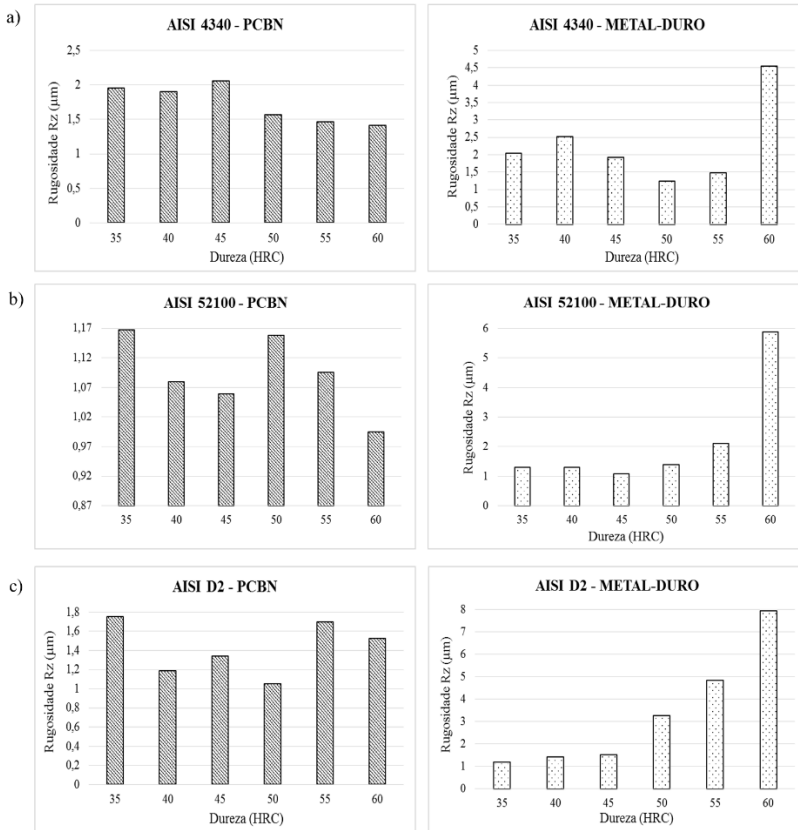
Porém, vale ressaltar que para a dureza de 55 HRC, na usinagem do aço AISI 4340, ambas as ferramentas apresentaram desempenho similar. O que diferencia este comportamento dos outros dois materiais está relacionado às microestruturas dos mesmos, as quais apresentam carbonetos eutéticos dispersos em sua matriz. Este fator é associado à severidade das condições do processo, dificultando a remoção de material e, consequentemente, promovendo a elevação dos valores de rugosidade, enquanto que o aço AISI 4340 é formado basicamente por martensita.

Comparando a eficiência das duas ferramentas de corte utilizadas para todos os casos acima abordados, pode-se afirmar que com a ferramenta de PCBN foram obtidos baixos valores de rugosidade para todas as análises realizadas, sendo que para as durezas entre 35 e 45 HRC, ambas as ferramentas tiveram desempenho similar. Entretanto, no que tange a usinagem do aço AISI D2, a ferramenta de metal-duro apresentou valores muito elevados de rugosidade para a dureza de 50 HRC. Já para os aços AISI 4340 e AISI 52100, a ferramenta de metal-duro teve um bom desempenho para durezas até 55 HRC.

Analisando somente o fator dureza, observou-se que esta variável não foi um fator determinante no desempenho da ferramenta de PCBN, a qual apresentou valores de rugosidade muito similares mesmo com a alteração dos níveis de dureza dos materiais, conforme a Figura 5.4.

Avaliando a ferramenta de metal-duro, verifica-se que para este caso a dureza apresenta um maior nível de influência, ocorrendo um aumento crescente nos valores da rugosidade R_z com a elevação da dureza dos materiais, principalmente para os aços AISI 52100 e AISI D2. Tais comportamentos observados estão diretamente relacionados às características das ferramentas de corte. Devido a maior estabilidade térmica e dureza da ferramenta de PCBN, a superfície obtida tende a apresentar uma qualidade de acabamento superior a ferramenta de metal-duro, a qual sofre um maior desgaste devido a elevação de dureza e, consequentemente, gerando maiores avarias na superfície usinada.

Figura 5.4 – Comportamento da rugosidade Rz com a elevação dos valores de dureza para o aço a) AISI 4340, b) AISI 52100 e c) AISI D2.



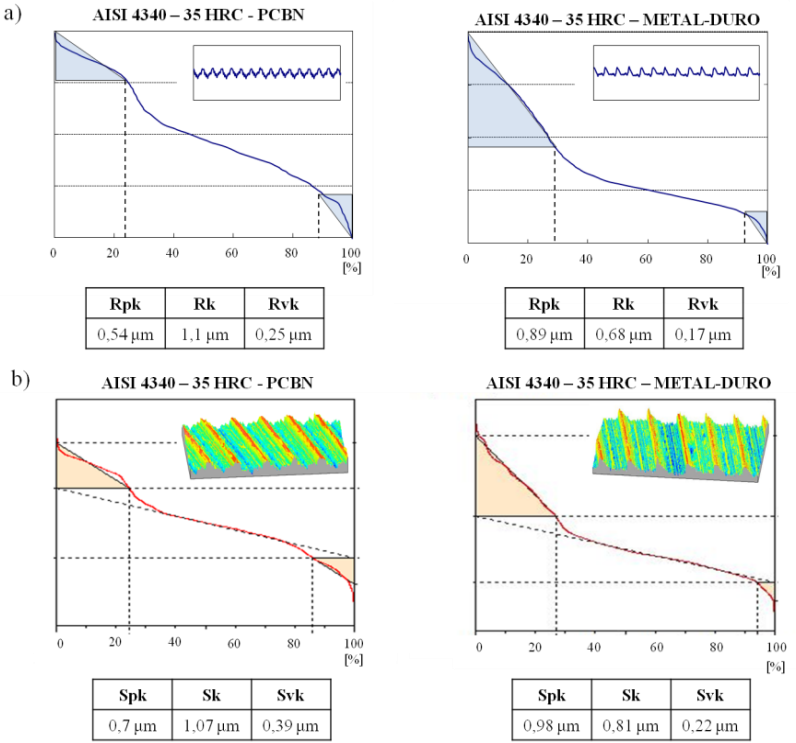
FONTE: Do autor.

Em relação aos ensaios realizados e os considerando dentro do ambiente industrial, a escolha de qual análise de rugosidade deve ser empregada depende da importância desta variável no processo. Por exemplo, no caso de aplicações em uma produção seriada, por mais que sejam avaliados parâmetros mais complexos na etapa de projeto e desenvolvimento do componente, o controle do processo restringe-se ao uso de rugosímetros e parâmetros mais genéricos. Os resultados obtidos neste primeiro item são a prova de que é possível obter bons resultados, para superfícies de alta qualidade e desempenho, utilizando-se apenas a análise 2D.

Devido às limitações existentes, a análise somente dos parâmetros 2D e 3D não é suficiente para obter informações mais amplas e relativas ao desempenho funcional das superfícies. Assim, a fim de tentar suprir tais lacunas, foi realizada a análise das curvas de Abbott-Firestone obtidas tanto pela análise 2D quanto 3D e os respectivos perfis de rugosidade. Para esta análise foram selecionadas as seguintes durezas: 35, 45, 55 e 60 HRC. Esta escolha foi realizada devido as similaridades existentes entre os resultados obtidos para as durezas de 35 e 40 HRC, bem como para 45 e 50 HRC.

As curvas de Abbott e as topografias geradas para o aço AISI 4340, com 35 HRC constam na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Curvas de Abbott para o aço AISI 4340 com 35 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



FONTE: Do autor.

Conforme apresentado na Figura 5.5, observa-se que ambas as análises para o aço AISI 4340, com 35 HRC, resultaram em curvas com comportamentos similares. Assim, para esta condição, a análise somente da curva gerada pelo perfil 2D consegue satisfazer os requisitos para maior entendimento do comportamento da superfície.

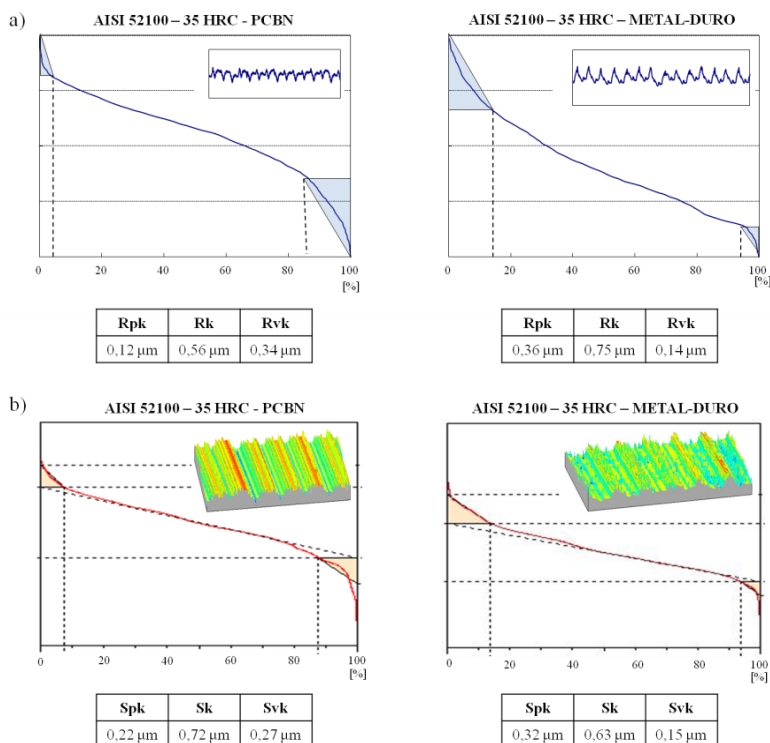
Entretanto, quando se compara o comportamento dos dois tipos de ferramenta de corte, os resultados diferem daqueles obtidos pela análise somente dos parâmetros em si. Apesar de ambas apresentarem um perfil periódico, típico do processo de torneamento, a superfície usinada com a ferramenta de PCBN apresenta picos menos elevados e vales mais profundos, o que garante uma maior retenção de lubrificante. Já com a ferramenta de metal-duro obteve-se uma superfície com picos muitos elevados e vales pouco profundos, o que revela uma superfície que sofrerá maior desgaste durante a carga inicial. Por outro lado, obteve-se um menor valor de R_k para esta condição, o que é desejável pois garante à superfície uma elevada resistência mecânica e uma alta capacidade de suportar cargas em operações de contato, condição essencial para as aplicações do aço AISI 4340.

Apesar dos valores obtidos para os parâmetros R_a e S_a serem similares para esta análise em específico, as superfícies geradas são diferentes, consequentemente, as geometrias das ferramentas acarretam tais distinções. Assim, a presença de picos mais elevados na superfície gerada pela ferramenta de metal-duro pode estar relacionada ao seu ângulo de saída positivo, o qual permite que os cavacos escoem mais facilmente, sendo sua quebra muitas vezes insuficiente, gerando assim cavacos do tipo contínuo [67].

Enquanto que a ferramenta de PCBN, por apresentar microgeometria arredondada, a área de contato da ferramenta com a peça é maior e a formação de cavacos é dificultada, principalmente no gume secundário, onde os cavacos gerados são muito finos. Além disto, a pequena espessura de usinagem, quando utilizado o gume arredondado, o ângulo de saída é mais negativo que o obtido com o gume chanfrado, garantindo assim, melhor acabamento da superfície usinada [11].

Foram avaliadas também as curvas de Abbott obtidas para o aço AISI 52100 (35 HRC), conforme a Figura 5.6.

Figura 5.6 – Curvas de Abbott para o aço AISI 52100 com 35 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



FONTE: Do autor.

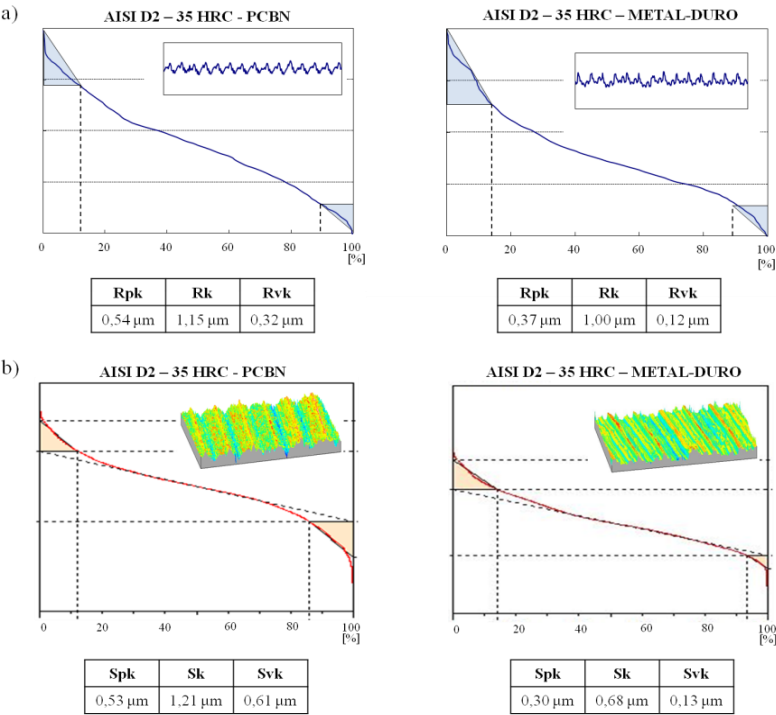
Avaliando-se as curvas de Abbott obtidas para o aço AISI 52100, verifica-se que para este caso somente a análise 2D não é suficiente, apresentando disparidades em relação à curva obtida por análise 3D. Apesar dos valores dos parâmetros funcionais obtidos pela análise 3D serem similares na usinagem com as diferentes ferramentas, verifica-se que tal resultado não é suficiente para a caracterização da superfície, já que os perfis obtidos diferem entre si.

O corpo de prova usinado com ferramenta de metal-duro apresenta muitas irregularidades e picos distribuídos ao longo da área analisada, o que pode comprometer a resistência mecânica da superfície, situação essa crítica para aplicação desta ferramenta para a fabricação de rolamentos,

por exemplo. Já a região usinada com a ferramenta de PCBN, apresenta-se mais uniforme e com a ausência de picos muito elevados, podendo ser caracterizada como formada por platôs, condição desejável para as possíveis aplicações deste material. Como ambas as ferramentas apresentam mesmo raio de ponta, o melhor acabamento obtido com a ferramenta de PCBN está diretamente associado à geometria da mesma. O maior ângulo de saída da ferramenta de metal-duro permite a geração de cristas entre as marcas de avanço, similar a um efeito de tração nestas cristas; enquanto que o ângulo negativo da ferramenta de PCBN promove o efeito contrário.

Para este mesmo patamar de dureza, foram obtidas as curvas de Abbott-Firestone e os perfis para o aço AISI D2, conforme Figura 5.7.

Figura 5.7 – Curvas de Abbott para o aço AISI D2 com 35 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



FONTE: Do autor.

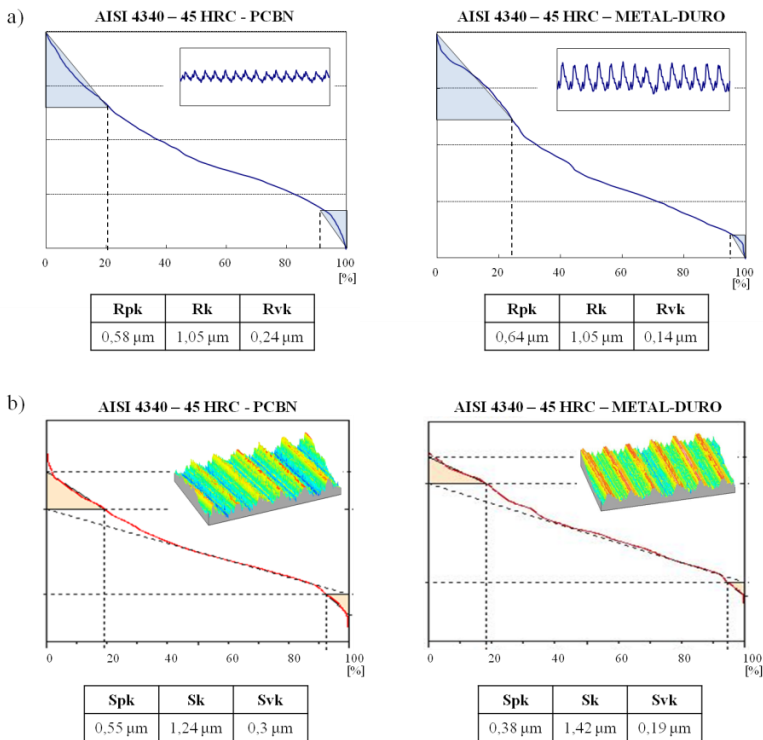
A partir da Figura 5.7, verifica-se que ambas as superfícies apresentaram poucos picos elevados ao longo da região analisada, garantindo um menor desgaste da mesma. A superfície usinada com ferramenta de PCBN, além disso, apresenta vales mais profundos garantindo maior retenção de lubrificante. E em contrapartida, a superfície obtida com a ferramenta de metal-duro apresenta uma região de apoio menor, condição que proporciona maior resistência mecânica.

A partir dos resultados obtidos para os três materiais usinados, verifica-se que apesar do valor de dureza ser o mesmo para todos, isso não significou que os comportamentos das superfícies fossem similares. Ou seja, quando situações de engenharia mais complexas são consideradas, como no torneamento de materiais endurecidos, este tipo de parâmetro não é o balizador dos resultados obtidos. Nos casos avaliados, a microestrutura dos materiais foi o fator determinante na qualidade da superfície obtida, bem como no desempenho das ferramentas de corte empregadas no processo.

Alterando-se o parâmetro de dureza e elevando-o para 45 HRC, ocorre um aumento da resistência mecânica, o qual provoca a elevação do contato na interface cavaco-ferramenta e, conseqüentemente a redução da resistência ao cisalhamento. Assim, observa-se que para as três condições que serão analisadas, há uma melhora no que diz respeito ao acabamento da superfície.

Para esta nova condição de dureza, foram feitas as análises para o aço AISI 4340, conforme Figura 5.8.

Figura 5.8 – Curvas de Abbott para o aço AISI 4340 com 45 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.

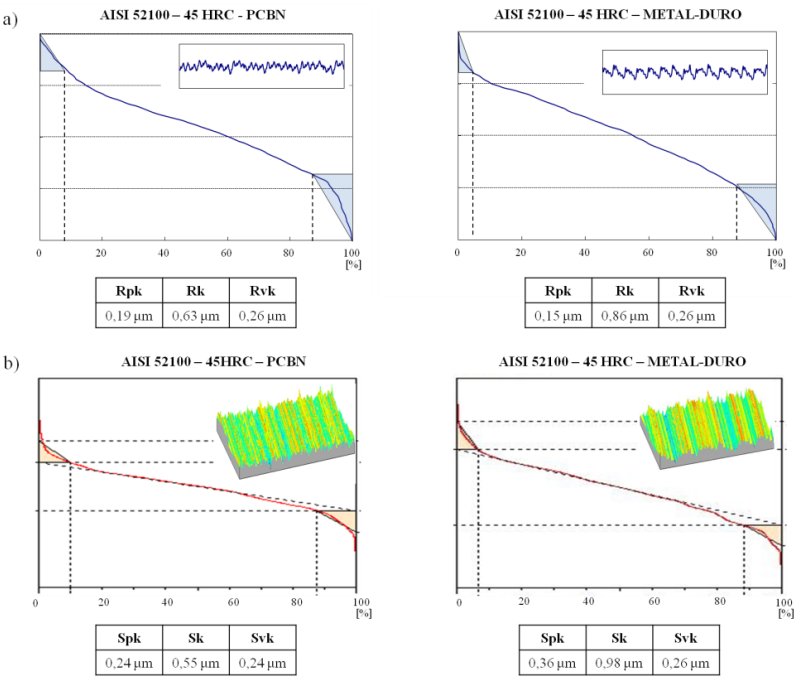


FONTE: Do autor.

Para o aço AISI 4340 nesta dureza superior, verifica-se uma maior distinção entre os resultados que foram gerados pela análise 2D, comprovando que tal método nem sempre é confiável para a obtenção de informações detalhadas sobre a superfície.

Assim, para o aço AISI 4340, as superfícies obtidas por ambas as ferramentas apresentaram grande resistência mecânica e a ausência de picos muito elevados, fatores esses que quando correlacionados garantem à superfície um bom desempenho funcional. A superfície obtida com ferramenta de PCBN, entretanto, possui uma melhor capacidade de retenção de lubrificante, como pode ser confirmado pelas curvas obtidas e pelo perfil gerado.

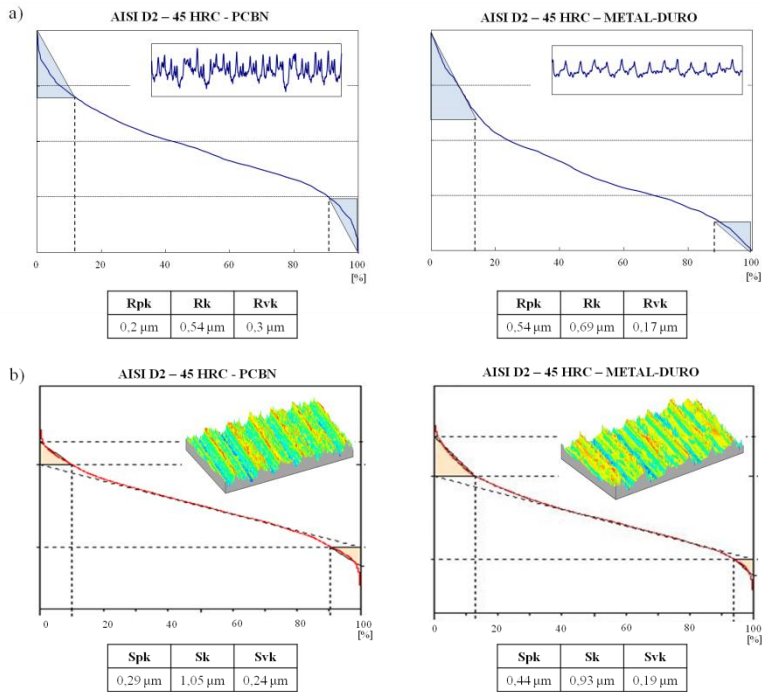
Figura 5.9 – Curvas de Abbott para o aço AISI 52100 com 45 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



FONTE: Do autor.

Já para o aço AISI 52100 (Figura 5.9), verifica-se que as curvas e perfis obtidos por ambas as análises são similares. Deste modo, sugere-se que se realize um estudo em cada etapa específica do processo, para fins de verificação da aplicação destes métodos de análise no setor industrial. A respeito das características funcionais das superfícies, ambas as ferramentas de corte geraram superfícies com elevada resistência mecânica associada a uma boa capacidade de retenção de lubrificantes, condição essa desejada para a produção de rolamentos, por exemplo, em que este material é amplamente utilizado.

Figura 5.10 – Curvas de Abbott para o aço AISI D2 com 45 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



FONTE: Do autor.

Pela análise das curvas de Abbott obtidas para o aço AISI D2 (Figura 5.10), verifica-se que tanto a análise 2D quanto 3D apresentam perfis similares, em que foram geradas superfícies com elevada resistência mecânica, do tipo platôs, as quais não sofrerão um severo desgaste inicial devido à ausência de picos muito elevados e apresentaram razoável capacidade de lubrificação. Entretanto, a superfície usinada com a ferramenta de metal-duro apresenta um acabamento da superfície com qualidade inferior à obtida com a ferramenta de PCBN.

Uma explicação possível para tal fenômeno pode estar associada a presença de carbonetos na microestrutura do material, os quais podem vir a se localizar na superfície e, conseqüentemente dificultar a penetração da ferramenta no material, bem como provocar maiores desgastes na mesma, devido à elevada dureza desses carbonetos, o aumento das componentes

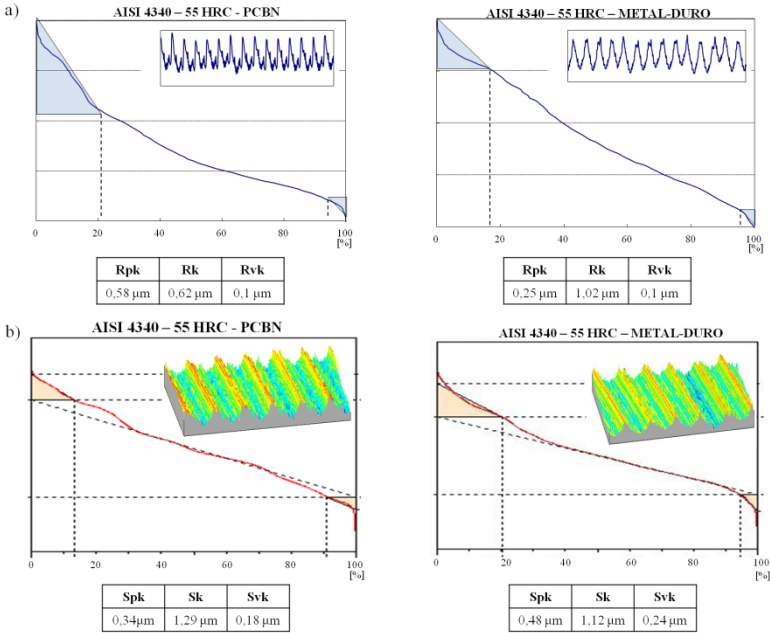
da força de usinagem e dos gradientes de temperatura. Entretanto, pelo fato da ferramenta de PCBN possuir dureza mais elevada, associado a um ângulo de saída negativo, a topografia gerada possui melhor qualidade.

Comparando os resultados obtidos para as durezas de 35 e 45 HRC, verifica-se que o aumento da resistência mecânica e das temperaturas na interface cavaco-ferramenta geradas pela elevação da dureza proporcionou o bom desempenho das ferramentas de corte e, consequentemente, a melhoria da qualidade do acabamento das superfícies usinadas. Além disso, verifica-se que para a dureza de 45 HRC, as superfícies obtidas pelas ferramentas de PCBN e metal-duro apresentaram características tribológicas muito similares.

Segundo Tonshoff, Arendt e Amor [24], quando a dureza da peça excede 50 HRC, as componentes da força de usinagem tendem a aumentar. Este fenômeno é ocasionado tanto pelo aumento da resistência mecânica do material quanto pela elevação da força de atrito na região. Concomitantemente, nesta mesma faixa de dureza, os cavacos gerados são do tipo dente de serra, os quais são formados pela propagação de trincas, geradas pelo aumento e redução da tensão de escoamento do material [21]. Assim, a partir desta faixa, dependendo do tipo de ferramenta empregada, parâmetros de corte e material usinado, o acabamento da superfície pode apresentar maiores irregularidades e deformações.

No caso da usinagem do aço AISI 4340, com dureza de 55 HRC (Figura 5.11), verifica-se que ambas as ferramentas geraram superfícies similares, com presença de picos distribuídos ao longo da região analisada, o que pode acarretar maior desgaste da mesma na aplicação da carga inicial, além de apresentarem relativa capacidade de armazenamento de lubrificante.

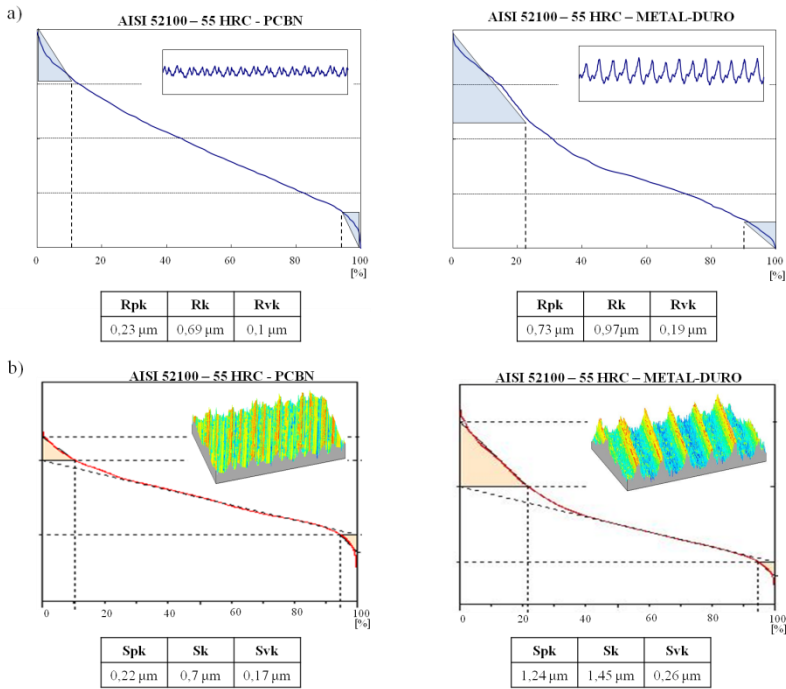
Figura 5.11 – Curvas de Abbott para o aço AISI 4340 com 55 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



FONTE: Do autor.

Levando em consideração os parâmetros quantificados no início do capítulo, a dureza de 55 HRC foi determinante para o bom desempenho da ferramenta de metal-duro na usinagem dos aços AISI 52100 e AISI D2, a qual passou a sofrer severo processo de desgaste e consequentemente gerando superfícies com baixa qualidade de acabamento. Isso fica bem demonstrado quando se avalia a usinagem do aço AISI 52100, conforme a Figura 5.12.

Figura 5.12 – Curvas de Abbott para o aço AISI 52100 com 55 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.

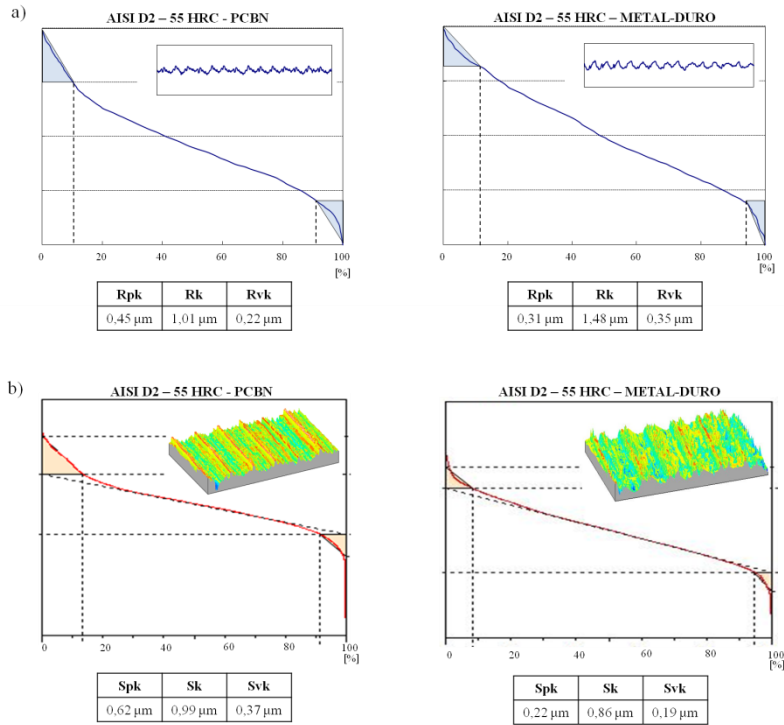


FONTE: Do autor.

Verifica-se que a superfície obtida com a ferramenta de metal-duro possui uma topografia bem diferente da que foi gerada com a ferramenta de PCBN, com a presença de picos muito elevados. Além disso, levando-se em consideração os parâmetros Rk, Sk, Rpk e Spk, a superfície gerada possui maior probabilidade de sofrer severo desgaste e apresentar baixa resistência mecânica, comprometendo a qualidade funcional da peça. Como este material é comumente empregado na fabricação de rolamentos, características como elevada resistência mecânica e boa capacidade de retenção de lubrificantes são essenciais para garantir o bom desempenho do componente fabricado, que nesta situação somente foi possível obter com a ferramenta de PCBN.

Com a elevação da dureza e consequentemente com o aumento das componentes da força de usinagem, a ferramenta de corte sofre maior solicitação, provocando o maior desgaste da mesma. Além disso, a presença de carbonetos de elevada dureza na matriz do aço AISI 52100 intensifica este fenômeno, comprometendo assim o desempenho da ferramenta de metal-duro.

Figura 5.13 – Curvas de Abbott para o aço AISI D2 com 55 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



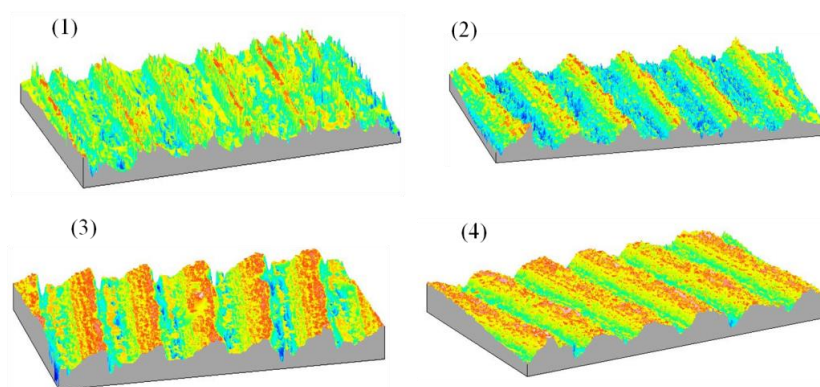
FONTE: Do autor.

O mesmo fenômeno pode ser observado na usinagem do aço AISI D2 (Figura 5.13), com dureza de 55 HRC, usinada com ferramenta de metal-duro. Esta superfície usinada encontra-se completamente irregular, podendo-se verificar que houve um processo de “esmagamento” da mesma. Tal característica pode estar está associado ao severo desgaste

sofrido pela ferramenta de corte. Por outro lado, a superfície usinada com a ferramenta de PCBN apresentou-se mais regular, com uma satisfatória área de apoio, entretanto a baixa presença de vales compromete a qualidade de lubrificação da peça.

Além da superfície usinada com ferramenta de metal-duro apresentar baixa qualidade em termos de acabamento, outra característica observada foi a variação de topografias obtida na usinagem do corpo de prova, podendo o fato ser até mesmo comprovado fazendo-se uma inspeção visual. Assim, foram realizadas imagens topográficas do corpo de prova em quatro pontos distintos, variando-se do diâmetro externo ao interno.

Figura 5.14 – Topografias geradas na usinagem do aço AISI D2 com 55 HRC.

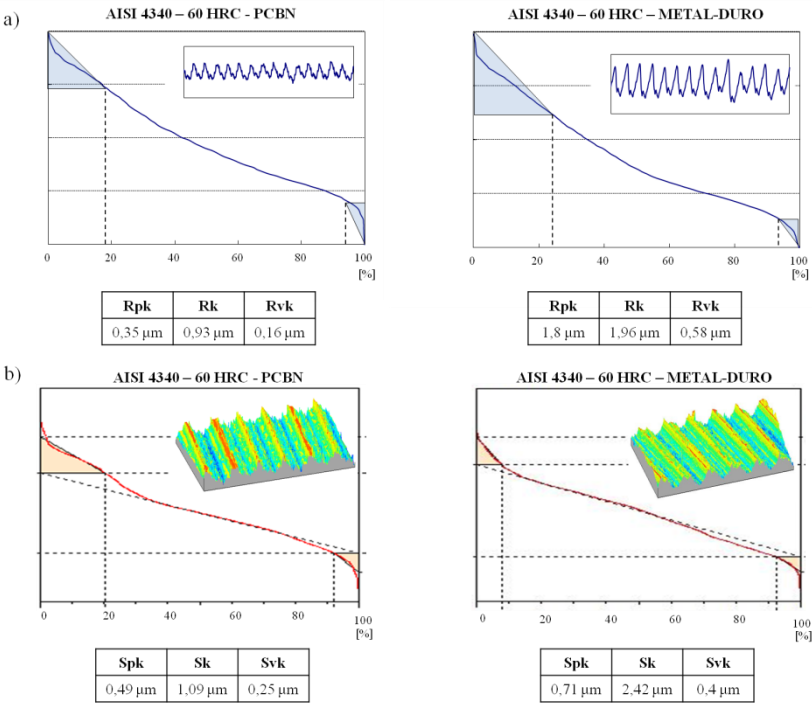


FONTE: Do autor.

É possível observar na Figura 5.14, analisando a imagem (1), que representa o início da usinagem até a imagem (4), quando ela se encerra, que a ferramenta pode ter sofrido um severo desgaste nos segundos iniciais do processo, se propagando ao longo do corpo de prova. Este fenômeno é uma possível explicação para os elevados valores de rugosidade e incerteza encontrados na análise dos parâmetros no início deste item.

Pela análise do aço AISI 4340 (60 HRC), conforme Figura 5.15, verifica-se que as falhas na ferramenta de corte de metal-duro tornam-se mais evidentes neste nível de dureza. A maior resistência da ferramenta na usinagem deste material deve-se a sua microestrutura formada por martensita, com a ausência de carbonetos.

Figura 5.15 – Curvas de Abbott para o aço AISI 4340 com 60 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



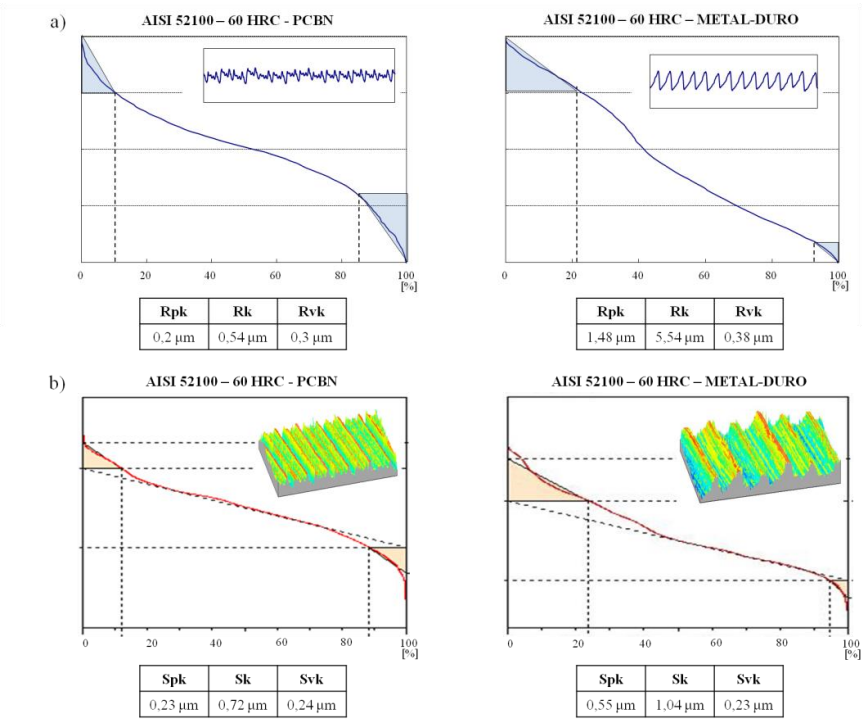
FONTE: Do autor.

Para os parâmetros definidos, a superfície obtida com a ferramenta de PCBN possui melhor acabamento da superfície, mesmo apresentando picos elevados ao longo de sua área. O fator crítico da superfície obtida com a ferramenta de metal-duro é o desgaste elevado da ferramenta, o qual provoca uma variação de topografias, tal qual ocorreu com o aço AISI D2 (Figura 5.14).

Aumentando o valor de dureza da peça do aço AISI 52100 (Figura 5.16), aumentam-se os desgastes sofridos pela ferramenta de metal-duro e consequentemente as superfícies geradas apresentam-se com maiores irregularidades e variações de topografia. Enquanto que a superfície usinada com a ferramenta de PCBN apresenta um bom desempenho, gerando uma superfície com elevada resistência mecânica e com a

presença de inúmeros vales distribuídos ao longo da área analisada, fator que garante características adequadas para aplicação da peça.

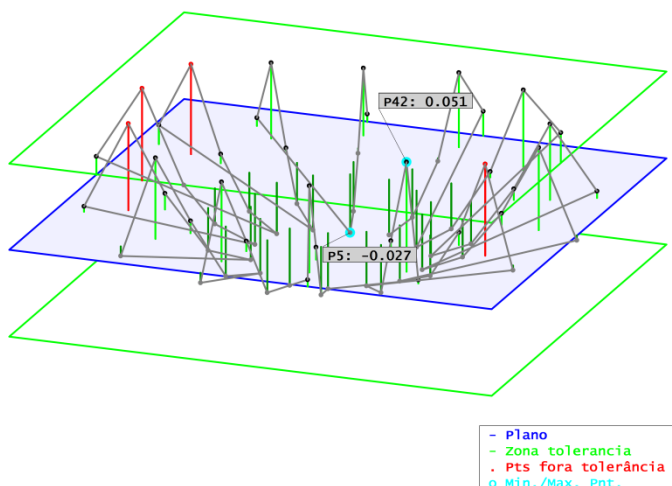
Figura 5.16 – Curvas de Abbott para o aço AISI 52100 com 60 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



FONTE: Do autor.

Além disso, foi verificado que os corpos de prova obtidos apresentaram variações de planeza, conforme Figura 5.17. Este fenômeno ainda está relacionado com os desgastes sofridos pela ferramenta de metal-duro, os quais afetam diretamente a integridade do gume e a estabilidade da ferramenta e consequentemente provocam alterações no que tange as tolerâncias geométricas.

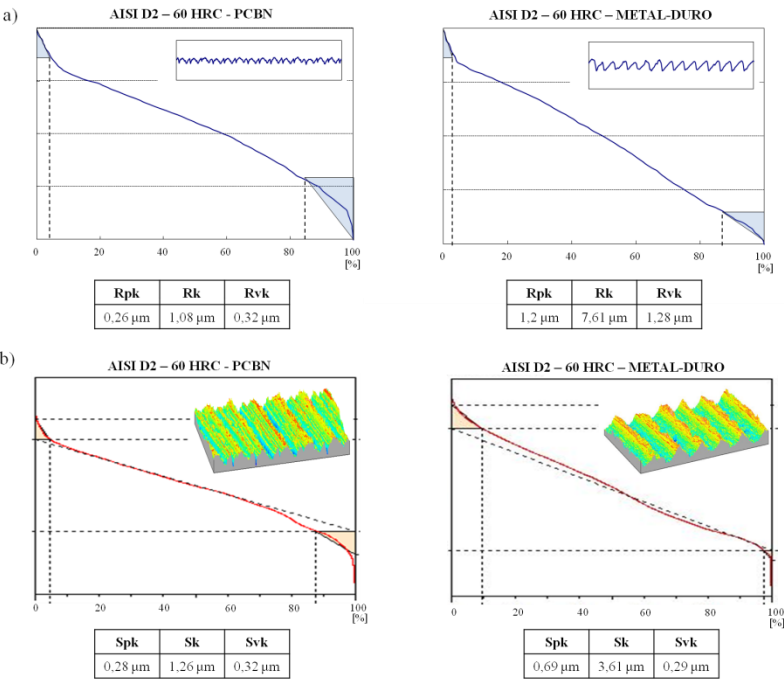
Figura 5.17 – Análise de planeza do corpo de prova do aço AISI 52100 com 60 HRC.



FONTE: Do autor.

Para o aço AISI D2 (Figura 5.18), verifica-se que mesmo apresentando uma microestrutura que dificulta o processo de usinagem, a superfície usinada com a ferramenta de PCBN pode ser definida como platôs, com a ausência de picos elevados, associados à elevada resistência mecânica e condições adequadas para a lubrificação. Por outro lado, e como já fora obtido para o patamar de dureza anterior, a superfície usinada com a ferramenta de metal-duro apresentou inúmeras irregularidades ao longo do corpo de prova usinado, devido ao severo desgaste sofrido pela ferramenta de corte.

Figura 5.18 – Curvas de Abbott para o aço AISI D2 com 60 HRC obtidas pela análise a) 2D e b) 3D.



FONTE: Do autor.

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a análise de rugosidade 3D permite a obtenção de informações mais detalhadas sobre as topografias das superfícies, bem como das características tribológicas das mesmas. Entretanto, para os aços usinados com ferramenta de metal-duro, com durezas até 50 HRC, verifica-se que a utilização das curvas de Abbott obtidas pelo método 2D, bem como o perfil gerado, conseguem abarcar as principais características funcionais da superfície. Entretanto, acima deste nível de dureza, este tipo de análise se torna insuficiente, devido à variedade de fenômenos que ocorrem e que estão correlacionados com à integridade da ferramenta, os valores das componentes da força de usinagem e os efeitos térmicos sobre diferentes materiais.

Quanto ao desempenho das ferramentas utilizadas, a qualidade das superfícies obtidas e de suas características funcionais, observou-se que tanto a ferramenta de PCBN quanto a de metal-duro obtiveram ótimos resultados até durezas de 50 HRC. Entretanto, a partir deste patamar e no caso da usinagem dos aços AISI 52100 e AISI D2 as superfícies geradas pela ferramenta de metal-duro não apresentaram bom desempenho. Já para o aço AISI 4340, esta limitação ocorreu para dureza inferior a 60 HRC. No caso da ferramenta de PCBN, em todos os casos analisados, conseguiu-se obter superfícies características satisfatórias.

A menor dureza e geometria positiva da ferramenta de metal-duro associada às condições severas de usinagem, provocou a perda de material da ferramenta, gerando desgastes e, conseqüentemente, obtendo-se superfícies irregulares e com características não desejadas para o campo de aplicação dos aços usinados. Porém, realizando-se algumas alterações quanto à geometria da ferramenta ou mesmo no processo de usinagem, como a aplicação de meio lubrificarrefrigerante, é possível que os resultados obtidos possam ser similares ou iguais aos obtidos com ferramenta de PCBN.

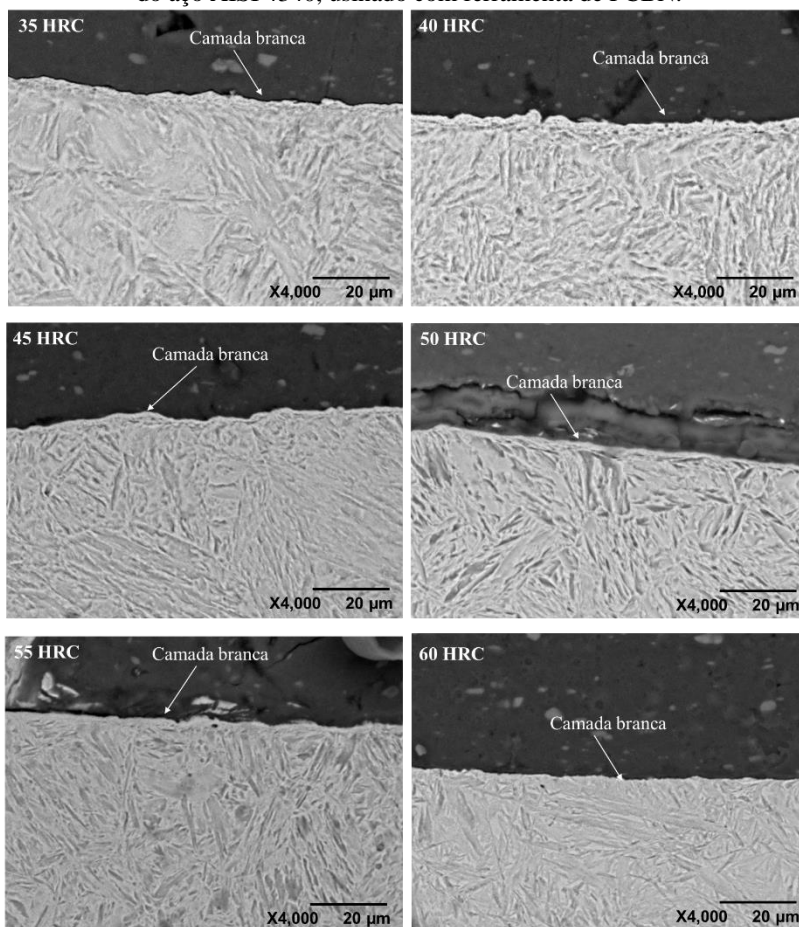
5.2 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS

Os resultados obtidos pelas análises das rugosidades 2D e 3D levantam aspectos e informações importantes sobre a topografia da superfície, entretanto estes dados não conseguem abarcar os fenômenos presentes nas camadas da subsuperfície. Assim, posteriormente foi realizada a análise das alterações microestruturais nos três aços usinados, nas condições previamente definidas.

Para a obtenção das imagens das alterações microestruturais pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foi necessário realizar ampliações da ordem de X4000, ou seja, as alterações observadas foram muito sensíveis, como será mostrado ao longo das análises.

A Figura 5.19 apresenta as micrografias das camadas abaixo da superfície do aço AISI 4340, usinado com ferramenta de PCBN, nos seis valores de dureza utilizados neste trabalho.

Figura 5.19 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI 4340, usinado com ferramenta de PCBN.



FONTE: Do autor.

Conforme a Figura 5.19, alterações nas camadas da subsuperfície são promovidas em todas as condições analisadas, porém todas de forma muito sensível, limitando-se a espessuras não maiores que 2μm. Como foi observado por Tönshoff, Karpuschewski e Borbe [82], devido as condições geométricas e cinemáticas, o tempo de contato entre a ferramenta e a superfície da peça é significativamente menor no processo de torneamento do que na retificação, por exemplo, resultando em baixos valores de energia específica de corte. Isto explica as menores extensões

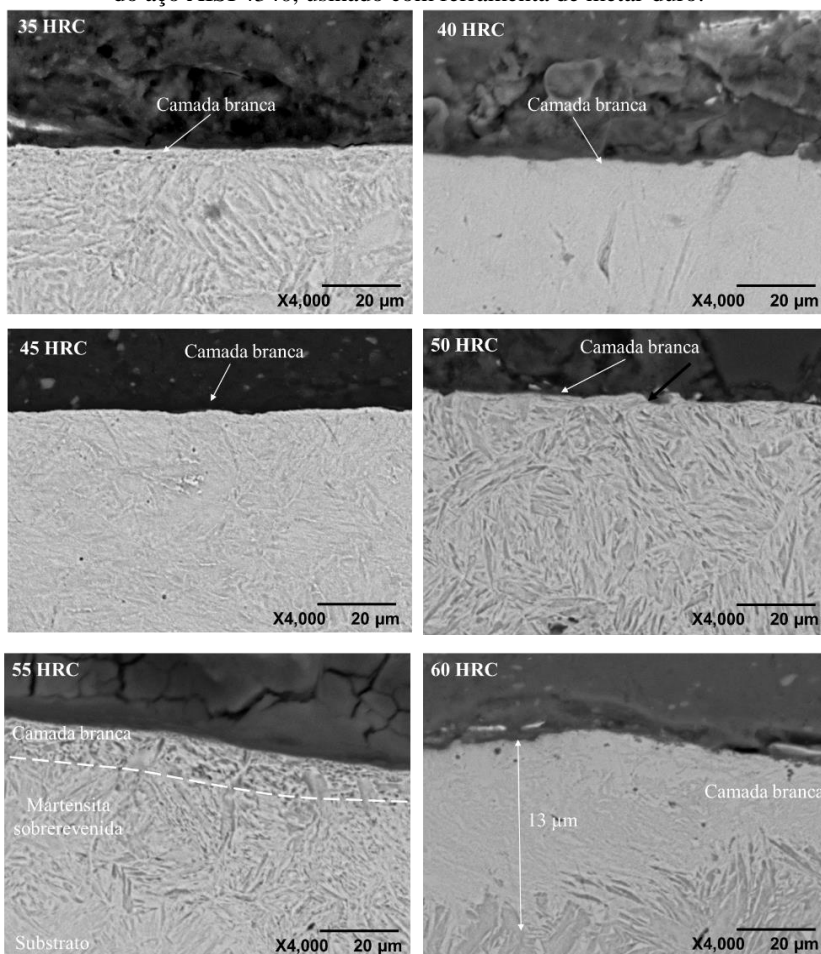
de camada branca presentes nos ensaios realizados. Ou seja, os parâmetros de corte aplicados e as geometrias das ferramentas de corte contribuíram para a obtenção de superfícies com elevado desempenho.

A camada branca formada é predominantemente um resultado do processo de rápido aquecimento e resfriamento, com a ocorrência de transformação de fase. Entretanto, a influência da deformação plástica sobre a formação desta região não pode ser descartada, já que a mesma promove o refinamento e distorção dos grãos.

Avaliando os efeitos da dureza na alteração microestrutural, verifica-se que este parâmetro não foi determinante na espessura da camada afetada, sendo que nos seis casos apresentado, essa não é superior a 2 μ m. Correlacionando estes dados com os obtidos no item anterior, verifica-se que os dois resultados complementam-se, de modo que as topografias geradas não apresentaram distorções, bem como não foram afetadas por desgastes presentes na ferramenta de corte e, consequentemente, não provocaram grandes alterações na camada da subsuperfície.

Também foram feitas micrografias com as amostras usinadas com ferramenta de metal-duro, conforme Figura 5.20.

Figura 5.20 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI 4340, usinado com ferramenta de metal-duro.



FONTE: Do autor.

Conforme Javidi, Rieger e Eichlseder [14], nas seis condições observadas, há a formação de duas regiões distintas: uma em que os grãos sofreram severa distorção e outra logo abaixo e que não sofreu alterações. No que condiz à região da camada branca, as espessuras também não superaram o valor de 2 μm, para as durezas entre 35 e 50 HRC, sendo que para os outros dois valores de dureza, comportamentos diferentes foram obtidos.

A micrografia para o aço AISI 4340, com 55 HRC, apresenta com clareza três regiões distintas. A primeira, referente à camada branca, com elevada distorção dos grãos que a compõem e com espessura de $\pm 4\mu\text{m}$. Logo abaixo percebe-se uma extensa área de martensita sobrerrevenida e mais abaixo, a região que não sofreu nenhum tipo de alteração. Apesar desta superfície apresentar maior deformação que as anteriores de menor dureza, ela ainda possui condições de ser aplicadas em trabalho, pois a camada afetada ainda é muito pequena quando comparada com as obtidas nos demais processos de fabricação, como a retificação ou até mesmo no torneamento com o emprego de velocidade de corte mais elevada do que a utilizada neste ensaio.

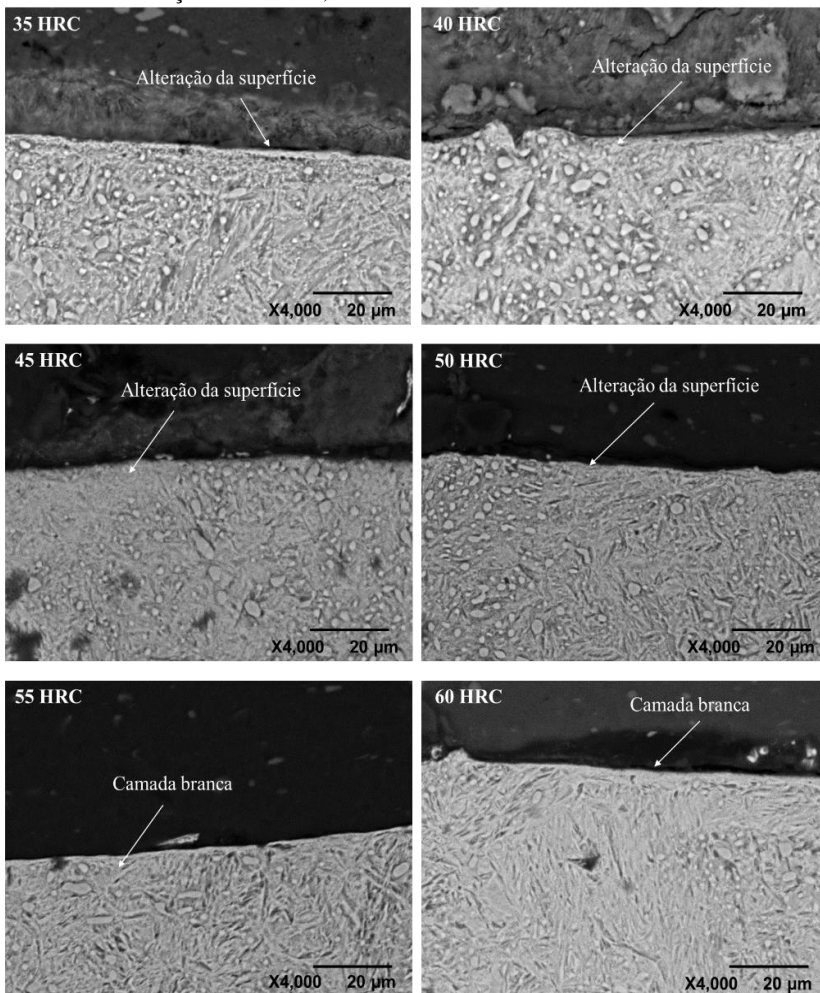
A amostra com dureza de 60 HRC, foi a mais afetada pelos fenômenos termo-mecânicos do processo de torneamento, com alteração de $\pm 15\mu\text{m}$ de extensão. É possível perceber que apesar da presença da camada branca (martensita não revenida), os grãos que a compõem apresentam-se de forma distorcida e refinada, condições essas que garantem a essa região maior valor de dureza, como afirma a literatura.

A presença de alterações mais severas para os níveis de dureza de 55 e 60 HRC está relacionada à maior solicitação da ferramenta de corte, a qual associada ao aumento de temperatura e da dureza do material, sofre consequentes desgastes. Além disso, comparando esses resultados com os obtidos para a rugosidade, verifica-se que os níveis de dureza que apresentaram maiores valores de rugosidade são os que apresentaram também maiores regiões com alterações microestruturais.

A partir das duas análises realizadas, é possível afirmar que a ferramenta de metal-duro possui desempenho similar à de PCBN para a usinagem do aço AISI 4340 até a dureza de 50 HRC, entretanto para valores superiores recomenda-se a ferramenta de PCBN.

Para o aço AISI 52100 também foram feitas micrografias nas seis condições de dureza analisadas, conforme a Figura 5.21. Por este material possuir microestrutura diferenciada, com a presença de carbonetos eutéticos em sua composição, as alterações ocorridas tendem a ser um pouco diferentes das que foram observadas para o aço anteriormente analisado.

Figura 5.21 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI 52100, usinado com ferramenta de PCBN.



FONTE: Do autor.

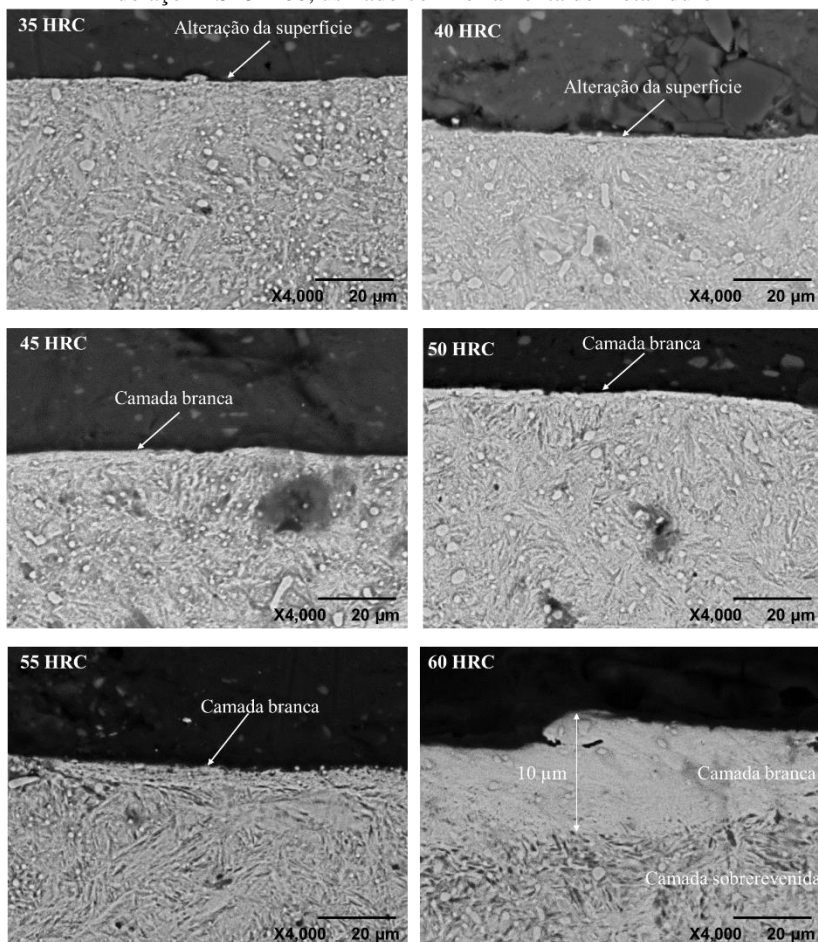
Assim, para o torneamento com ferramenta de PCBN, verifica-se a presença de uma fina camada que sofreu alteração, sendo essa menor que 1μm, para as durezas entre 35 e 50 HRC. No que se refere às durezas de 55 e 60 HRC, a região com a presença de camada branca é maior, fenômeno esse que está relacionado ao aumento da dureza do material e da temperatura na interface cavaco-ferramenta.

Apesar da maior dificuldade na usinagem deste tipo de material, não foi observada a fragmentação ou cisalhamento dos carbonetos em nenhum dos casos estudados. Como o tamanho do carboneto presente neste aço é de apenas 1 μm e o avanço, a profundidade de corte e o raio do gume são muito maiores, é improvável que tais alterações venham a ocorrer.

Outro fenômeno comumente relatado na literatura sobre alterações microestruturais são os efeitos térmicos na superfície. Apesar das altas temperaturas geradas pelo processo de usinagem associadas a ausência de meio lubrificador na operação, não foi possível identificar alterações somente desta natureza. A elevada condutividade térmica da ferramenta de PCBN é um fator que contribui diretamente com a ausência deste fenômeno, já que boa parte do calor gerado é eliminado pela ferramenta de corte, sendo somente uma pequena fração absorvida pela peça.

As micrografias da Figura 5.22 apresentam as superfícies usinadas do aço AISI 52100 com ferramenta de metal-duro.

Figura 5.22 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI 52100, usinado com ferramenta de metal-duro



FONTE: Do autor.

Observa-se que para as durezas entre 35 e 50 HRC há a ocorrência de alteração da superfície e a presença de uma fina camada branca, restringindo-se a uma extensão não superior a 2μm. Vale ressaltar que as diferenças entre as imagens também estão relacionadas à mudança da dureza do material. A baixas durezas ocorre a predominância de bainita, entretanto com a elevação deste parâmetro ocorre a formação de martensita.

A partir de 55 HRC verifica-se que ocorre um aumento da camada branca, a qual nesta fase apresenta uma espessura de aproximadamente 4µm. Comparando esta informação à obtida nas análises de rugosidade, verifica-se que apesar do aumento brusco dos valores de rugosidade para esta condição, a região afetada foi ainda muito pequena.

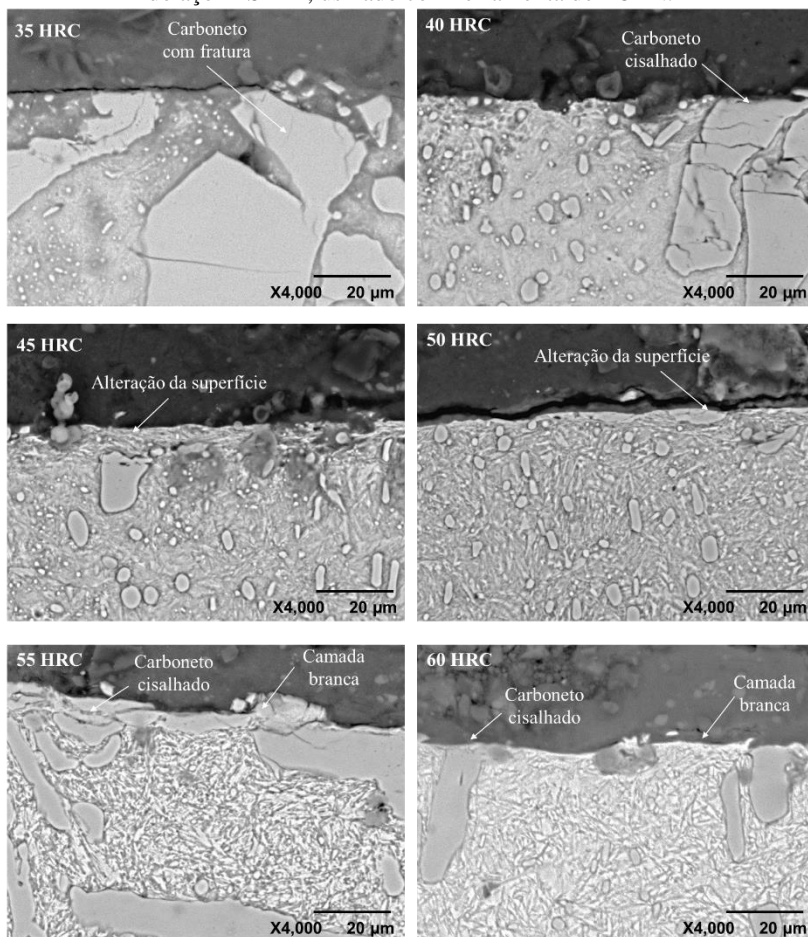
Com o aumento da dureza para 60 HRC e a elevação dos gradientes de temperatura, ocorre maior solicitação da ferramenta de corte, provocando maiores perdas de material e desgaste da mesma, o que provocou a formação de uma extensa camada alterada. Os resultados obtidos para a rugosidade, neste nível de dureza, com a presença de irregularidade e baixa qualidade de acabamento da superfície, estão diretamente relacionados à alteração observada.

A ferramenta de metal-duro, por apresentar menor dureza quando comparada ao PCBN, não consegue garantir a integridade do gume quando submetida a condições adversas, sofrendo maior desgaste e, consequentemente aumentando a área de contato da ferramenta com a peça. Associado a isso, a menor condutividade térmica deste material de ferramenta garante que uma fração maior do calor gerado no processo seja absorvido pela peça, provocando o efeito observado na micrografia.

Entretanto, é possível verificar que apesar da alteração provocada, os carbonetos não sofreram fragmentação, e permaneceram intactos na região que sofreu maior impacto pelo processo de usinagem. Assim, pode-se afirmar que a ferramenta de metal-duro permite obter um bom desempenho na usinagem do aço AISI 52100 com dureza de até 55 HRC, levando-se em consideração os parâmetros de corte utilizados e as condições do processo.

A presença de carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 no aço AISI D2, em maior número e com dimensões maiores daqueles presentes no aço AISI 52100, é um dos fatores que implicam diretamente na qualidade do acabamento da superfície e no desempenho funcional da peça obtida com este tipo de material. Assim, foram feitas micrografias das amostras do aço AISI D2 usinadas com ferramenta de PCBN, conforme Figura 5.23.

Figura 5.23 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI D2, usinado com ferramenta de PCBN.



FONTE: Do autor.

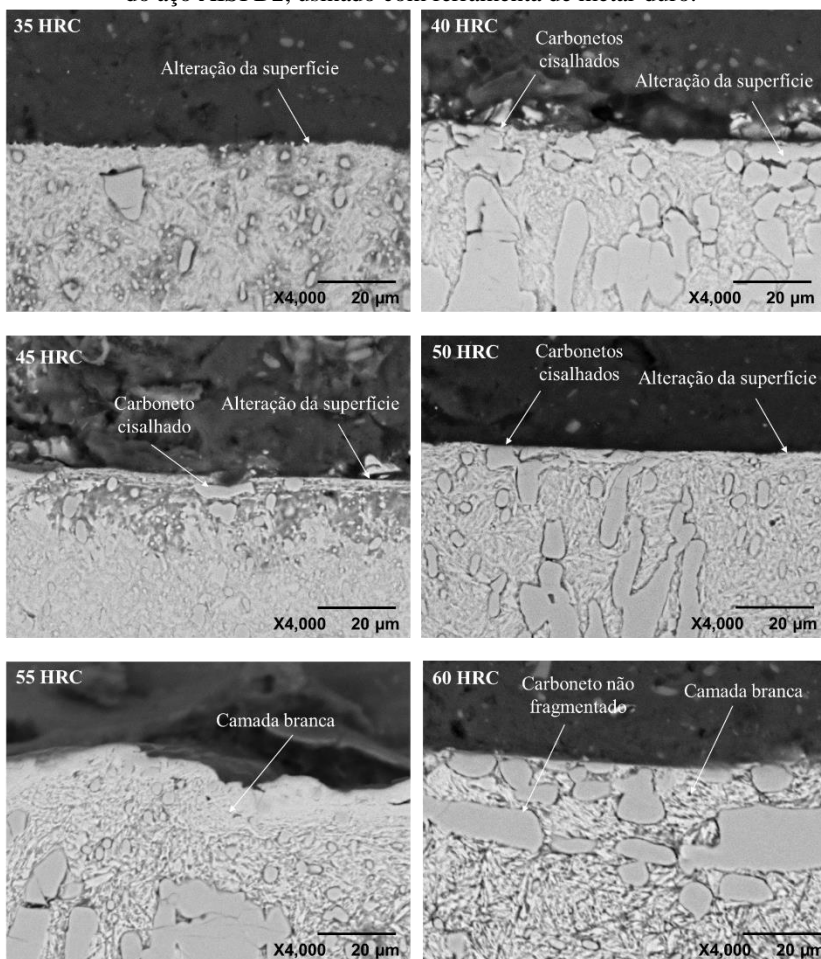
Para as durezas de 35 e 40 HRC praticamente não são observadas regiões submetidas a alterações mecânicas e nem térmicas. Além disso, a presença de carbonetos de elevadas dimensões ou que não sofreram fragmentação afetam diretamente a qualidade do acabamento da superfície gerada, pois dificultam o processo de usinagem devido à maior solicitação das ferramentas de corte.

Além disso, é possível observar que os carbonetos de maiores dimensões nas duas imagens sofreram fraturas. Uma possível explicação para a ocorrência deste fenômeno pode estar relacionada ao aumento das componentes da força de usinagem ou à preparação das amostras para análise metalográfica pode ter afetado a estrutura destes carbonetos.

Para as durezas entre 45 e 60 HRC, verifica-se que apesar da elevação dos patamares de dureza, a ocorrência de alteração da superfície resume-se a uma fina camada, com a presença de camada branca e carbonetos cisalhados. Neste caso, as superfícies obtidas provavelmente possuirão melhor acabamento já que os carbonetos apresentam menores dimensões e encontram-se mais dispersos na matriz do material. Estas características são responsáveis pela forte anisotropia de propriedade entre as direções longitudinal e transversal [37].

A Figura 5.23 apresenta as micrografias das amostras de aço AISI D2, usinadas com ferramenta de metal-duro.

Figura 5.24 – Micrografias das camadas da subsuperfície dos corpos de prova do aço AISI D2, usinado com ferramenta de metal-duro.



FONTE: Do autor.

Para as durezas de 35 e 40 HRC, não é possível observar alterações de origem mecânica ou térmica. Ainda em relação a este caso, a presença de carbonetos de elevadas dimensões pode provocar a obtenção de uma superfície com baixa qualidade de acabamento, mesmo que as condições do processo não sejam severas.

A partir de 45 HRC, verifica-se a formação de uma camada submetida à alteração da superfície, sem afetar a condição microestrutural

do material. Entretanto, tais fenômenos tornam-se mais evidentes para as durezas de 55 e 60 HRC, em que extensas camadas brancas são observadas. Além disso, outra característica pertinente é a presença de carbonetos na região deformada e a manutenção da integridade dos mesmos, os quais apesar das condições adversas do processo de usinagem, não sofreram fragmentação. Isto está relacionado à geometria da ferramenta de corte, a qual possui ângulo de saída positivo, diminuindo os esforços de usinagem e consequentemente facilitando o escoamento do cavaco.

As maiores deformações observadas nestes dois últimos casos estão associadas à maior solicitação da ferramenta de corte, que quando submetida à usinagem deste tipo de material e nestes valores de dureza, acaba sofrendo maior desgaste e, consequentemente, afetando as camadas da subsuperfície da peça usinada.

O melhor desempenho da ferramenta de PCBN está relacionado a sua maior dureza e estabilidade térmica. Entretanto, com modificações na geometria da ferramenta de corte, no tipo de revestimento utilizado ou com a utilização de fluido de corte, ferramentas de metal-duro possivelmente já possam ser utilizadas para patamares mais elevados de dureza.

A partir dos resultados obtidos, reforça-se a importância dos estudos sobre alterações microestruturais nas camadas da subsuperfície de peças usinadas, principalmente relacionados aos aços com presença de carbonetos eutéticos em sua microestrutura. Além disso, ratifica-se que a análise de rugosidade e topografia não são parâmetros suficientes para obter conclusões sobre o desempenho funcional do componente.

No que tange aos ensaios realizados, verifica-se que ambas as ferramentas de corte possuem desempenhos similares para as durezas até 50 HRC. Entretanto acima deste valor, as superfícies usinadas com ferramenta de metal-duro apresentam elevados níveis de alteração, os quais estão associados à maior solicitação desta ferramenta, sofrendo maior desgaste e, consequentemente, afetando diretamente a condição das camadas da subsuperfície.

Com a ferramenta de PCBN, por outro lado, foi possível gerar superfícies sem elevados níveis de alteração para todas as durezas analisadas. A sua maior dureza e resistência a choques térmicos e mecânicos garantem a manutenção da integridade do gume e, consequentemente, o melhor desempenho na obtenção de superfícies com melhores acabamento e desempenho.

Em relação às alterações observadas nos materiais, na maioria dos ensaios observou-se que essas foram muito sensíveis, sendo que este

fenômeno está relacionado aos parâmetros de corte e geometrias das ferramentas, permitindo assim, a obtenção de superfícies com elevado desempenho.

Além disso, para os aços usinados foi observada a presença de camada branca (martensita não revenida), sendo esta relacionada aos fenômenos de aquecimento e resfriamento, os quais provocam transformação de fase no material. Em relação ao aço AISI 52100, apesar da existência de carbonetos na matriz deste material, não foi observado o cisalhamento dos mesmos. Por outro lado, este fenômeno foi recorrente para os ensaios com o aço AISI D2, afetando diretamente a qualidade das superfícies obtidas.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas a partir da análise dos resultados, bem como serão sugeridos trabalhos que possam ser desenvolvidos futuramente dentro da mesma linha temática.

6.1 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi analisada a integridade da superfície, com avaliações das rugosidades 2D e 3D e alterações microestruturais, no torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e metal-duro. A fim de verificar os diferentes comportamentos das superfícies obtidas com este processo, foram utilizados três materiais com distintas características microestruturais - a saber – os aços AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2, em seis valores de dureza, variando entre 35 e 60 HRC.

Inicialmente foram avaliados os parâmetros de rugosidade 2D (R_a , R_z e R_t) e 3D (S_a , S_z e S_t) e verificou-se que na maioria dos casos apresentados, os valores de R_a e S_a foram similares, sendo maiores diferenças observadas para os parâmetros S_z e S_t e seus correspondentes no plano 2D. Essa maior diferença está relacionada à falta de uma definição bem consolidada dos parâmetros 3D, os quais, dependendo do conceito utilizado, podem gerar valores muito distintos entre si.

No que tange ao comportamento dos materiais, para valores de dureza até 50 HRC, o aço AISI 52100 apresentou menores valores de rugosidade, devido a sua maior resistência e estabilidade quando submetido a condições severas. Enquanto que maiores valores de rugosidade foram observados para as superfícies obtidas com o aço AISI D2. Tal comportamento está relacionado à presença de carbonetos eutéticos em sua matriz, os quais podem ficar aderidos à superfícies, dificultando o processo de usinagem e, consequentemente, resultando em baixa qualidade de acabamento.

Em relação a influência da dureza na qualidade da superfície obtida, verifica-se que com o aumento desta variável, e a consequente elevação da resistência mecânica dos materiais e a redução das componentes da força de usinagem, houve a redução dos valores de rugosidade e a melhoria do acabamento da superfície. Esta condição foi observada para todos os ensaios realizados com ferramenta de PCBN. Entretanto, para as superfícies usinadas com ferramenta de metal-duro, este comportamento foi observado somente para durezas até 50 HRC, em

que as superfícies dos aços AISI 52100 e AISI D2, em especial, sofreram aumentos bruscos nos valores de rugosidade. Este mesmo comportamento foi observado para todos os materiais com dureza de 60 HRC. A possível explicação para este fenômeno está relacionado a maior solicitação da ferramenta de corte, ocasionando desgaste na mesma e gerando assim superfícies com maiores irregularidades. Além disso, foi verificado que as incertezas para estes dois casos apresentaram valores muito elevados, sinalizando a presença de alterações ao longo dos ensaios.

No que tange aos ensaios realizados e os considerando dentro do ambiente industrial, os resultados obtidos neste primeiro item são a evidência de que é possível avaliar adequadamente superfícies de alta qualidade e desempenho, utilizando-se apenas a análise 2D.

Devido às limitações existentes na análise somente dos parâmetros de usinagem e a fim de se obter informações quanto às características funcionais das superfícies usinadas, realizou-se a análise das curvas de Abbott-Firestone e dos perfis gerados para as topografias das superfícies obtidas. Como alguns resultados obtidos foram similares, optou-se por análises das durezas de 35, 45, 55 e 60 HRC.

A partir dos resultados obtidos para os três materiais usinados, com valores de dureza de 35 e 45 HRC, verifica-se que apesar do patamar de dureza ser o mesmo para todos, isso não significou que os comportamentos das superfícies fossem similares. Ou seja, quando situações de engenharia mais complexas são consideradas, como no torneamento de materiais endurecidos, este tipo de parâmetro não é o balizador dos resultados obtidos. Nos casos avaliados, a microestrutura dos materiais foi o fator determinante na qualidade da superfície obtida, bem como no desempenho das ferramentas de corte empregadas no processo.

Para as durezas de 35 HRC, foi observado nos três materiais, que as superfícies obtidas pela ferramenta de PCBN provavelmente venham a ter um melhor desempenho, apresentando menores irregularidades e melhores propriedades funcionais. Este comportamento está associado à geometria deste tipo de ferramenta, a qual apresenta ângulo de saída negativo, garantindo a proteção do gume, maior estabilidade à ferramenta e, consequentemente, melhor acabamento da superfície.

Aumentando o valor de dureza para 45 HRC, verificou-se maior similaridade entre as superfícies obtidas por diferentes ferramentas. Assim, para o aço AISI 4340 ambas as ferramentas de corte geraram superfícies com menor presença de picos, garantindo assim maior resistência mecânica, condição desejada para o campo de aplicação deste aço, como engrenagens e eixos. Quanto ao aço AISI 52100, as topografias

apresentaram boa capacidade de retenção de lubrificante e alta capacidade de suporte de cargas em operações de contato, propriedades essas que garantem o melhor desempenho de rolamentos, por exemplo, em que este aço é usualmente aplicado. Já as superfícies para o aço AISI D2 apresentaram pouco picos e vales, podendo ser consideradas como superfícies platafórmicas, o que garante às matrizes produzidas com este aço elevada resistência mecânica e resistência ao desgaste.

Para durezas de 55 e 60 HRC, observou-se que os dados obtidos para as topografias das superfícies complementam os resultados para as análises dos parâmetros de rugosidade. Assim, enquanto com a ferramenta de PCBN foram geradas superfícies regulares e com propriedades desejadas para as possíveis aplicações de cada material, as que foram obtidas com ferramenta de metal-duro, conforme observado nos parâmetros de rugosidade, apresentaram alterações bruscas em suas topografias. Este comportamento está diretamente relacionado ao maior desgaste desta ferramenta para estes patamares de dureza. Além disso, verificou-se que esse desgaste também provocou alterações quanto à planeza dos corpos de prova usinados.

Para verificar os efeitos do processo de usinagem nas camadas da subsuperfície, foram realizadas análises das alterações microestruturais. Observou-se que na maioria dos casos, as camadas alteradas apresentaram-se pouco extensas. Uma possível explicação para este resultado está relacionada aos parâmetros de corte utilizados e às geometrias das ferramentas de corte, as quais permitiram a obtenção de superfícies com elevado desempenho. Além disso, verificou-se que a dureza não foi uma variável determinante no grau de alteração gerado.

Em relação ao desempenho das ferramentas de corte, as superfícies com durezas até 50 HRC usinadas com metal-duro apresentaram comportamento similar às obtidas com ferramenta de PCBN. Entretanto, acima deste valor foram observadas maiores alterações, com camadas afetadas com espessuras de até 15 μm .

Para os três aços foi observada a presença de camada branca, sendo esta resultante do processo de rápido aquecimento e resfriamento, com a ocorrência de transformação de fase. Além disso, duas regiões distintas, uma com elevado nível de deformação dos grãos e outra com sem alteração podem ser percebidas ao longo das micrografias analisadas. Devido a presença de carbonetos de maiores dimensões, a alteração mais comum no aço AISI D2 foi o cisalhamentos dos carbonetos aderidos à superfície.

Em linhas gerais, avaliando todos os resultados obtidos, pode-se afirmar que as superfícies obtidas para os três materiais com ferramentas de PCBN e metal-duro de grãos ultrafinos apresentaram elevada qualidade e desempenho para valores de dureza entre 50 e 55 HRC. Para patamares mais elevados, a ferramenta de PCBN permitiu a obtenção de melhores resultados.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas sugestões para trabalhos futuros relacionados à integridade da superfície no torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e metal-duro:

- Realizar ensaios para análise de tensões residuais e avaliar a relação destas com os comportamentos das superfícies;
- Realizar ensaios de retificação com a finalidade de comparar os resultados obtidos por esses dois processos de usinagem;
- Variar os parâmetros de corte, a fim de verificar o grau de influência dos mesmos na qualidade das superfícies obtidas e nas alterações geradas nas camadas da subsuperfície;
- Investigar o comportamento da rugosidade e das alterações microestruturais quando usinadas com ferramentas de diferentes geometrias;
- Realizar ensaios de microdureza de modo a compreender o comportamento da dureza ao longo das camadas submetidas a alteração microestrutural;
- Realizar ensaios com a presença de fluido de corte, de modo a verificar quais alterações ocorrem;
- Analisar os cavacos formados, a fim de verificar a presença de camada branca ou de carbonetos nos mesmos.

REFERÊNCIAS

1. GRIFFITHS, B. **Manufacturing Surface Technology**. Londres: Penton Press, 2001.
2. BOEHS, L. et al. Análise da textura e integridade das superfícies de camisas para motores de combustão interna. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2., 2003, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: COBEF, 2003.
3. FIELD, M.; KAHLES, J. F. Review of surface integrity of machine components. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, p. 153-163. 1971.
4. KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, p. 22-45. 2005.
5. BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKENA, B. Advancing cutting technology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, p. 483-507. 2003.
6. KÖNIG, W.; KLINGER, M.; LEINK, R. Machining hard materials with geometrically defined cutting edges - field of applications and limitations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, p. 61-64. 1990.
7. KOEPFER, C. Hard Turning as an Alternative to Grinding. **Production Machining**. 2010. Disponível em: <<http://www.productionmachining.com/articles/hard-turning-as-an-alternative-to-grinding>>. Acesso em: 05 jun. 2015.
8. GRZESIK, W. Machining of Hard Materials. In: DAVIM, J. P. **Machining - Fundamentals and Recent Advances**. Londres: Springer-Verlag London Limited, 2008b.
9. LAHIFF, C.; GORDON, S.; PHELAN, P. PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 23, p. 638-644. 2007.

10. GUO, Y. B.; YEN, D. W. Hard turning versus grinding - the effect of process-induced residual stress on rolling contact. **Wear**, p. 393-399. 2004a.
11. DINIZ, A. E.; OLIVEIRA, A. J. de. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of materials processing technology**, v. 195, p. 275-281. 2008.
12. GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials - theory, modelling and applications**. [S.l.]: Elsevier, 2008a.
13. MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.
14. JAVIDI, A.; RIEGER, U.; EICHLSEDER, W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. **International Journal of Fatigue**, v. 30, p. 2050-2055. 2008.
15. ASTAKHOV, V. P. Machining of hard materials - definitions and industrial applications. In: DAVIM, J. D. **Machining of hard materials**. Londres: Springer-Verlag, 2011.
16. KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da usinagem com ferramenta de corte de geometria definida - parte I**. Tradução de Walter Lindolfo Weingaertner e Rolf Bertrand Schroeter. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
17. POULACHON, G.; MOISAN, A.; JAWAHIR, I. S. On modelling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.50, p. 31-26. 2001b.
18. SHAW, M. C.; VYAS, A. The mechanism of chip formation with hard turning steel. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 47, p. 77-82. 1998.
19. POULACHON, G.; MOISAN, A. A contribution to the study of the cutting mechanisms during high speed machining. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 47, p. 73-76. 1998.

20. BOING, D. **Análise da adequação do sistema tribológico do par ferramenta-peça por meio da avaliação do desgaste da microgeometria de ferramentas de metal-duro e PCBN no torneamento de materiais endurecidos**. 2015. 89 f. Qualificação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2015.
21. POULACHON, G.; MOISAN, A.; JAWAHIR, J. S. Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools. **Wear**, v. 250, p. 576-586. 2001a.
22. NAKAYAMA, K.; ARAI, M.; KANDA, T. Machining characteristics of hard materials. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 37, p. 89-92. 1988.
23. MATSUMOTO, Y.; BARASH, M. M.; LIU, C. R. Cutting mechanisms during machining of hardened steels. **Material science and technology**, v. 3, p. 299-305. 1987.
24. TONSHOFF, H. K.; ARENDT, C.; AMOR, R. B. Cutting of hardened steel. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 49, p. 547-566. 2000.
25. BOUACHA, K. et al. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, v. 28, p. 349-361. 2010.
26. SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; SAMUEL, G. L. Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. **Measurement**, v. 45, p. 1872-1884. 2012.
27. ARSECULARATNE, J. A. et al. On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, p. 244-252. 2006.
28. BOING, D. **Análise da vida de ferramentas de PcBN no torneamento de ferro fundido branco com alto teor de cromo**.

2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Tupy, Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville. 2010.
29. REN, X. J. et al. Machinig of high chromium hardfacing materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 115, p. 423-429. 2001.
30. SMITH, G. T. **Cutting tool technology - industrial handbook**. [S.l.]: Springer, 2008.
31. POULACHON, G. et al. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, p. 139-144. 2003.
32. RANIERI, A. **Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 4340 com estruturas multifásicas e tratamento de nitrocarbonetação a plasma**. 2010. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2010.
33. ROLLS, V. Villares Rolls. **Villares Rolls**. 2015. Disponível em: <<https://www.villaresrolls.com/web/pt/default.aspx>>. Acesso em: 8 out. 2015.
34. MARU, M. M. **Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado**. 2003. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.
35. FRANCO JÚNIOR, A. R. **Obtenção de revestimento dúplex por nitretação a plasma e PVD-TiN em aços ferramenta AISI D2 e AISI H13**. 2003. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.
36. ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool steels**. 5. ed. [S.l.]: ASM International, 1998.

37. METALS-HANDBOOK. **Properties and selection:** irons, steels and high-performance alloys. [S.l.]: American Society for Metals, v. 1, 1993.
38. SILVA, A. L. V. da C. e; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
39. HAZAN, E.; SADIA, Y.; GELBSTEIN, Y. Characterization of AISI 4340 Corrosion Products Using Raman Spectroscopy. **Corrosion Science**, v. 74, p. 414-418. 2013.
40. NOGUEIRA, R. de C. **Caracterização mecânica e análise microestrutural com a técnica da tríplice ataque do aço multifásico AISI 4350**. 2013. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2013.
41. LEE, W. S.; SU, T. T. Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 87, p. 198-206. 1999.
42. CARREIRA, I. R. et al. Estudo do recobrimento superficial a plasma para uso em altas temperaturas de um aço 4340 com diferentes microestruturas. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 65., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2010. p. 2630-2640.
43. SOUZA, G. A. et al. Desenvolvimento e caracterização de estruturas bainíticas/martensíticas em aços. CONGRESSO ANUAL DA ABM, 63., 2008, Santos. **Anais...** Santos: ABM, 2008. p. 2791-2799.
44. LEWELLYN, D. T.; HUDD, R. C. **Steels: metallurgy and applications**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1998.
45. CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. v. 3. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.

46. BESWICK, J. M. The effect of chromium in high carbon bearing steels. **Metall Mater Trans**, p. 1897-1906. 1987.
47. WADSWORTH, J.; SHERBY, O. D. Influence of chromium on superplasticity in ultra-high carbon steels. **Journal of Materials Science**, v. 13, p. 2645-2649. 1978.
48. FARINA, P. F. da S. **Efeito das condições de tratamentos criogênicos e de alívio de tensões no ciclo térmico do aço ferramenta AISI D2**. 2011. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
49. ROBERTS, G. A.; CARY, A. R. **Tool steels**. 4. ed. [S.l.]: American Society for Metals, 1980.
50. MESQUITA, R. A.; LEIVA, D. R.; BARBOSA, C. A. Efeito das condições de tratamento térmico na microestrutura e propriedades mecânicas de aços ferramenta. Disponível em: <http://villaresmetals.us/english/files/Falhas_Trat_Termico.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2015.
51. LIMA, J. G. et al. Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. **International Journal of Materials Processing Technology**, v. 169, p. 388-395. 2005.
52. LEI, Y.; WU, E. Sintering characteristics and microstructure of WC-Co-VC/Cr₃C₂ ultrafine cemented carbides. **Rare Metals**, v. 28, p. 482-486. 2009.
53. GUO, Z. et al. Tool wear mechanism of WC-5TiC-10Co ultrafine cemented carbide during AISI 1045 carbon steel cutting process. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 35, p. 262-269. 2012.
54. GILLE, G. et al. Submicron and ultrafine grained hard materials for microdrills and metal cutting inserts. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, p. 3-22. 2002.

55. XIONG, J. et al. Tool life and wear of WC-TiC-Co ultrafine cemented carbide during dry cutting of AISI H13 steel. **Ceramics International**, v. 39, p. 337-346. 2013.
56. RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.
57. TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.
58. COROMANT, S. Torneamento de peças duras com CBN. **Site da Sandvik Coromant**. Disponível em:
<<http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/c-2940-137.pdf>>. Acesso em: 1 outubro 2015.
59. JIANG, W. et al. A CBN-TiN composite coating for carbide inserts: coating characterization and its applications for finish hard turning. **Thin Solid Films**, v. 201, p. 1451-1454. 2009.
60. CHOU, Y. K.; EVANS, C. J. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting. **Wear**, v. 225-229, p. 234-245. 1999.
61. CHOU, Y. K.; EVANS, C. J.; BARASH, M. M. Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 124, p. 274-283. 2002.
62. BOEHS, L.; STEIDEL, P. S.; FRIEDRICH, D. **Influência dos parâmetros de usinagem e da geometria da ferramenta sobre a rugosidade cinemática e do processo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16., 2001, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: COBEM, 2001. p. 467-476.
63. SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L.; MACEDO, S. E. M. Análise de forças no fresamento de topo reto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE

- FABRICAÇÃO, 1., 2001, Curitiba. **Anais...** Curitiba: COBEF, 2001.
64. THIELE, J. D. et al. Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100 steel. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 122, p. 642-649. 1999.
 65. KARPAT, Y.; ÖZEL, T. 3-D FEA of hard turning: investigation of PCBN cutting tool micro-geometry effects. **Transactions of NAMRI/SME**, p. 1-8. 2007.
 66. SOUZA, D. J. A. de. **Influência da microgeometria do gume e da classe de PCBN no corte ortogonal de aço rápido fabricado por metalurgia do pó**. 2013. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013.
 67. CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Investigation on machinability aspects of hardened AISI 4340 steel at different levels of hardness using coated carbide tools. **International Journal of Refractory Metal and Hard Materials**, v. 38, p. 124-133. 2013.
 68. DAVIM, J. **Surface Integrity in Machining**. 1. ed. Londres: Springer, 2010.
 69. HANDBOOK, A. **Surface engineering**. [S.l.]: ASM International, v. 5, 1994.
 70. KUNDRAK, J.; BANA, V. Microgeometry of bore holes after hard machining. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS AND DEVELOPMENT OF MACHINERY AND ASSOCIATED TECHNOLOGY (TMT), 7., 2003. Lloret de Mar: TMT, 2003. p. 93-96.
 71. ALICONA. Infinite Focus. Austria: Alicona, c2015.
 72. WAIKAR, R. A.; GUO, Y. B. A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding.

- Journal of Materials Processing Technology**, v. 197, p. 189-199. 2008.
73. M'SAOUBI, R. et al. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. **International Journal Sustainable Manufacturing**, v. 1, p. 203-236. 2008.
74. BELLOWS, G.; TISHLER, D. N. **Introduction to surface integrity**. Cincinnati: General Electric Company, 1970.
75. CHOU, Y. K.; EVANS, C. J. White layers and thermal modeling of hard turned surfaces. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 39, p. 1863-1881. 1999.
76. BOSHEH, S. S.; MANTIVEGA, P. T. White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speed using CBN tolling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 225-233. 2005.
77. GRIFFITHS, B. J. White layer formations at machined surfaces and their relationship to white layer formations at worn surfaces. **Journal of Tribology**, p. 165-171. 1985.
78. BARBACKI, A.; KAWALEC, M.; HAMROL, A. Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 133, p. 21-25. 2003.
79. SCHWACH, D. W.; GUO, Y. B. A fundamental study on the impact of surface integrity by hard turning on rolling contact fatigue. **International Journal of Fatigue**, v. 28, p. 1838-1844. 2006.
80. FARIAS, A. D. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido no aço ABNT 8620 cementado**. 2009. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

81. BRINKSMEIER, E.; BROCKHOFF, T. White layers in machining steels. In: INTERNATIONAL GERMAN AND FRENCH CONFERENCE ON HIGH SPEED MACHINING, 2., 1999, Darmstadt: [s.n.], 1999. p. 7-13.
82. TÖNSHOFF, H.; KARPUSCHEWSKI, B.; BORBE, C. Comparison of basic mechanisms in cutting and grinding of hardened steel. **Production Engeneering**, p. 5-8. 1997.
83. GUDDAT, J. et al. Hard turning of AISI 52100 using PCBN wiper geometry inserts and the resulting surface integrity. **Procedia Engineering**, v. 19, p. 118-124. 2011.
84. OLIVEIRA, A. J. de.; BOING, D.; SCHROETER, R. B. Effect of PCBN tool grade and cutting type on hard turning of high-chromium white cast iron. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 82, p. 797-807. 2015.
85. FAVORIT. **Cetificado de composição química**. Cachoeirinha, 2015.
86. VILLARES METALS. **Certificado de composição química**. Joinvile, 2015.
87. INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION. ISO 4288/1998: Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: profile method. Rules and procedures for the assessment of surface texture. [S.l.], 1996.
88. CAMPOS, C. N. de.; BOING, D.; SCHROETER, R. B. Análise do acabamento da superfície no torneamento do aço AISI 4340 com ferramentas de PCBN e metal-duro. In: COLÓQUIO DE USINAGEM, 19., 2015, Natal. **Anais...** Natal: Colóquio de Usinagem, 2015.